



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal

PROYECTO FIN DE CARRERA

# **Evaluación de estrategias de comunicación selectiva para redes de sensores inalámbricos**

Autor: Javier Baltasar Palma

Tutor: Jesús Cid Sueiro

Leganés, Noviembre de 2012



Título: Evaluación de estrategias de comunicación selectiva para redes de sensores inalámbricos

Autor: Javier Baltasar Palma

Tutor: Jesús Cid Sueiro

## EL TRIBUNAL

Presidente: Francisco Javier González Serrano

Vocal: Marcelino Lázaro Teja

Secretario: Ignacio Soto Campos

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 15 de Noviembre de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

## VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Porque estudiar una ingeniería es cosa de años. Años en los que encuentras buenos y malos momentos. Momentos que unas veces se vuelven difíciles, y otras te dan fuerzas para seguir adelante, pero que en definitiva no hubieran sido lo mismo sin todas esas personas con las que compartí ese tiempo, mi eterno agradecimiento para ellas.

A mi tutor, Jesús, por compartir conmigo tu conocimiento, por aconsejarme durante todo este tiempo y serme de tanta ayuda, sobretodo en la recta final. Por tu comprensión e implicación con mi proyecto.

A mi familia, por el apoyo recibido en casa. Por su infinita paciencia y por facilitarme todo lo posible esta tarea. Ha valido la pena.

A mis amigos. A los que ya jugaban conmigo en los recreos y a los que llegaron después. Por entender y valorar mis tiempos de retiro en la biblioteca, y compartir algunos de ellos. Por aguantar mis charlas de temas de mi carrera.

A los amigos que hice en la universidad, a esa lista de innumerables personas que recibimos apoyo mutuo. Por el magnífico ambiente que creáis. Porque así da gusto ir a la universidad.

A mis primos, los culpables de que abuela nos diga “la familia de los ingenieros”. Por su experiencia y sus consejos. Por ser mis maestros.

A los compañeros de trabajo, por su apoyo durante este último año, y por todo lo que he aprendido de ellos, y lo que me queda por aprender.

A toda esa gente que no se cansaba de preguntarme ¿Qué tal los exámenes?, ¿Has terminado ya el proyecto?

Porque ni que decir tiene que sin todos vosotros hubiera sido imposible llegar hasta aquí, gracias a todos.



# Resumen

Las redes de sensores inalámbricos son en la actualidad una de las tecnologías más prometedoras, debido a la multitud de aplicaciones en las que pueden tener utilidad. Se encuentran, por ejemplo, despliegues para medidas medioambientales, que pueden ayudar a prevenir o mitigar los daños producidos por desastres naturales, o soluciones a nivel industrial, para controles de producción o monitorización de estado de maquinarias y estructuras, previniendo así accidentes y minimizando costes para las empresas.

La capacidad inalámbrica de los sensores permite situarlos en lugares a los que no se puede acceder con cables. En los casos en los que los dispositivos pasan a funcionar sin suministro eléctrico, su vida útil queda asociada directamente al uso que den de sus baterías portátiles.

Dadas las graves consecuencias que podrían surgir a raíz de un fallo en la llegada de los datos tomados por los sensores de la red, no es de extrañar que en la literatura se encuentren numerosas técnicas para optimizar el uso de las baterías de los sensores inalámbricos.

Entre estas técnicas se encuentran las estrategias de comunicación selectiva, que establecen un umbral de transmisión en función de la importancia del mensaje a transmitir, lo cual evita desperdiciar energía transmitiendo mensajes con poca relevancia.

Hay un gran número de parámetros de configuración posibles para una red, y en función de ellos las estrategias de descarte de mensajes pueden ser más o menos eficientes. En este documento se evalúan algunas de ellas en entornos más realistas, con el objetivo de descubrir las ventajas y desventajas de cada una en distintos escenarios y obtener conclusiones que condicionen o faciliten su uso en aplicaciones reales.

Partiendo de estimaciones y cálculos teóricos, se llevan a cabo simulaciones de alto nivel aplicadas a redes de complejidad incremental.

Se presentan resultados para entornos realistas genéricos, de forma que, independientemente del objetivo final de la aplicación, se pueda prever el comportamiento del despliegue en función de su configuración.

**Palabras clave:** Evaluación, red de sensores inalámbricos, comunicación selectiva, umbral de transmisión, consumo de energía, envío de mensajes, entornos realistas.





# Abstract

Wireless sensor networks are nowadays one of the most promising technologies, due to the great number of applications where they can be useful. There are, for instance, deployments for environmental measurements, that can help to prevent or mitigate damages produced by natural disasters, or industrial level solutions, aimed to control production or monitoring the state of machines and structures, avoiding this way accidents and minimizing costs for business.

The wireless feature of the sensors allows placing them where wires present a lot of difficulties to be deployed. In cases that the devices work without external power supply, their useful life becomes associated directly to the use they do to the portable batteries.

Regarding the severe consequences that can rise from a failure at the measured data transmission, it is not surprising to find a lot of techniques aimed to optimize the use of batteries of wireless sensors.

Among these techniques are the selective communications strategies, which establish a transmission threshold in function of the importance of the message that needs to be transmitted, which avoid wasting energy transmitting messages with low relevance.

There are a lot of configuration parameters for a network, and in function of them the message discard strategies can be more or less efficient. In this document some of them are assessed at more realistic environments, with the aim of discovering the advantages and disadvantages of each one at different scenarios and obtain conclusions that condition or ease their use at real applications.

Taking as basis the theoretical estimations and calculus, several high level simulations are applied to incremental complexity networks.

Some results are presented for generic realistic environments, meaning that independently of the final target of the application, it could be foreseen the behavior of the deployment in terms of its configuration.

**Keywords:** Assessment, wireless sensor network, selective communication, transmission threshold, energy-aware, message sending, realistic scenario.



# Índice General

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	3
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Fases del desarrollo.....	5
1.4. Medios empleados .....	6
1.5. Estructura de la memoria .....	6
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Comunicaciones selectivas.....</b>	<b>10</b>
2.1.1. Fundamento teórico de los algoritmos .....	10
2.1.1.1. Modelo del sensor .....	10
2.1.1.2. Algoritmo Básico (LF).....	11
2.1.1.3. Algoritmo Cooperativo (GF) .....	12
2.1.2. Evaluación de los algoritmos .....	14
<b>2.2. Topologías de red .....</b>	<b>14</b>
2.2.1. Topologías monosalto .....	15
2.2.1.1. Red de dos nodos .....	15
2.2.1.2. Topología en estrella.....	15
2.2.2. Topologías multisalto.....	16
2.2.2.1. Topología en línea.....	16
2.2.2.2. Topología en árbol .....	16
2.2.2.3. Topología en malla .....	17
2.2.3. Elección de la topología.....	18
<b>2.3. Protocolos de encaminamiento .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4. Protocolos MAC aplicables .....</b>	<b>23</b>
2.4.1. Protocolos MAC de tiempo real duro .....	24

2.4.2.	Protocolos MAC de tiempo real blando.....	26
<b>2.5.</b>	<b>Modelos de pérdidas .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6.</b>	<b>Análisis de aplicabilidad.....</b>	<b>31</b>
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES INALÁMBRICOS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.</b>	<b>Estados de funcionamiento.....</b>	<b>34</b>
3.1.1.	Tx.....	34
3.1.2.	Rx.....	34
3.1.3.	Idle .....	34
3.1.4.	Sense .....	34
<b>3.2.</b>	<b>Elementos básicos de las motas.....</b>	<b>34</b>
3.2.1.	Procesador.....	35
3.2.2.	Memoria.....	35
3.2.3.	Sensor.....	36
3.2.4.	Subsistema de Comunicación inalámbrica .....	36
3.2.4.1.	Estándar de comunicación: ZigBee .....	37
3.2.4.2.	Modelo de consumo.....	40
3.2.5.	Otros periféricos.....	42
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.</b>	<b>Descripción del entorno de simulación .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.</b>	<b>Proceso de ejecución .....</b>	<b>47</b>
4.2.1.	Representación de los mensajes.....	47
4.2.2.	Máquina de estados.....	49
<b>4.3.</b>	<b>Aplicación de los algoritmos .....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.</b>	<b>Modelo de resultados .....</b>	<b>54</b>
<b>5.</b>	<b>ESCENARIOS Y RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1.</b>	<b>Topología de red en línea .....</b>	<b>58</b>
5.1.1.	Red con 3 nodos.....	58
5.1.1.1.	Importancias con distribución de probabilidad uniforme .....	58
5.1.1.2.	Importancias con distribución de probabilidad exponencial .....	60
5.1.1.3.	Importancias con distribución de probabilidad de Pareto.....	61
5.1.2.	Red con 5 nodos.....	62
5.1.2.1.	Importancias con distribución de probabilidad uniforme .....	63
5.1.2.2.	Importancias con distribución de probabilidad exponencial .....	64
5.1.2.3.	Importancias con distribución de probabilidad de Pareto.....	66
5.1.3.	Red con 20 nodos.....	67
5.1.3.1.	Importancias con distribución de probabilidad uniforme .....	68
5.1.3.2.	Importancias con distribución de probabilidad exponencial .....	70
5.1.3.3.	Importancias con distribución de probabilidad de Pareto.....	71
5.1.4.	Red con 50 nodos.....	73

5.1.4.1.	Importancias con distribución de probabilidad uniforme .....	73
5.1.4.2.	Importancias con distribución de probabilidad exponencial .....	75
5.1.4.3.	Importancias con distribución de probabilidad de Pareto.....	76
<b>5.2.</b>	<b>Topología de red de árbol.....</b>	<b>78</b>
5.2.1.	Elaboración del entorno .....	78
5.2.2.	Resultados .....	79
5.2.2.1.	Estación base en un extremo del mapa .....	79
5.2.2.2.	Estación base centrada en el mapa.....	80
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>83</b>
<b>6.1.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>84</b>
<b>6.2.</b>	<b>Líneas futuras.....</b>	<b>85</b>
<b>7.</b>	<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>87</b>
<b>7.1.</b>	<b>Organización del proyecto .....</b>	<b>87</b>
<b>7.2.</b>	<b>Presupuesto.....</b>	<b>87</b>



# Índice de figuras

Figura 1-1: Arquitectura hardware de las motas.....	4
Figura 2-1: Protocolo de difusión de información para el algoritmo cooperativo.....	14
Figura 2-2: Red de dos nodos: Transmisor (verde) y estación base (rojo) .....	15
Figura 2-3: Topología en estrella.....	15
Figura 2-4: Topología en línea.....	16
Figura 2-5: Topología en árbol .....	17
Figura 2-6: Topología en malla.....	17
Figura 2-7: Implicaciones de consumo de una red lineal multisalto .....	19
Figura 2-8: Topología en línea equidistante .....	20
Figura 2-9: Ejemplos de encaminamiento de tipo <i>Greedy</i> .....	22
Figura 2-10: Organización de los protocolos MAC de tiempo real .....	24
Figura 2-11: Supertrama RRMAC.....	24
Figura 2-12: Modo desprotegido (MAC de tiempo real).....	25
Figura 2-13: Modo protegido (MAC de tiempo real) .....	25
Figura 2-14: Supertrama VTS.....	26
Figura 2-15: Caso de ejemplo de CR-SLF.....	27
Figura 2-16: Supertrama LPRT .....	28
Figura 2-17: $b(x)$ y $p(x)$ para $L = 80, 120$ y $160$ , con $\alpha=2$ .....	30
Figura 3-1: Tasa de datos VS alcance de los distintos estándares de comunicaciones.....	37
Figura 3-2: Robustez de protocolos para WSN .....	38
Figura 3-3: Pila de protocolos ZigBee .....	39
Figura 3-4: Formato de la PPDU de ZigBee.....	40
Figura 3-5: Subsistema de comunicación inalámbrica .....	40

Figura 3-6: Diagrama de arquitectura de alto nivel de la cadena TX y RX del CC2420. .	42
Figura 4-1: Consumo energético de la mota en función del estado .....	47
Figura 4-2: Datos procedentes de una distribución uniforme de 1000 puntos .....	48
Figura 4-3: Datos procedentes de una distribución exponencial de 10000 puntos.....	48
Figura 4-4: Datos procedentes de una distribución de Pareto de 10000 puntos .....	49
Figura 4-5: Máquina de estados que gestiona la actividad de los nodos .....	50
Figura 4-6: Sucesión de estados en una red en línea .....	51
Figura 4-7: Diagrama de flujo para simular redes en línea.....	52
Figura 4-8: Gráfica de ejemplo con $P_s = 0.04$ . Umbrales de 0.5 a 9.5 en una red de 5 nodos .....	55
Figura 4-9: Gráfica de ejemplo con $P_s = 0.2$ . Umbrales de 0.5 a 9.5 en una red de 5 nodos .....	56
Figura 5-1: Rendimiento de los algoritmos en una red de 3 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple.....	58
Figura 5-2: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 3 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente.....	59
Figura 5-3: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme.....	59
Figura 5-4: Rendimiento de los algoritmos en una red de 3 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple.....	60
Figura 5-5: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 3 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente .....	60
Figura 5-6: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial .....	61
Figura 5-7: Rendimiento de los algoritmos en una red de 3 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple .....	61
Figura 5-8: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 3 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente .....	62
Figura 5-9: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto.....	62
Figura 5-10: Rendimiento de los algoritmos en una red de 5 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple.....	63
Figura 5-11: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 5 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente.....	63
Figura 5-12: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el cuarto nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme.....	64



Figura 5-13: Rendimiento de los algoritmos en una red de 5 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple .....	64
Figura 5-14: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 5 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente .....	65
Figura 5-15: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el cuarto nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial .....	65
Figura 5-16: Rendimiento de los algoritmos en una red de 5 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple .....	66
Figura 5-17: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 5 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente .....	66
Figura 5-18: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el cuarto nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto.....	67
Figura 5-19: Rendimiento de los algoritmos en una red de 20 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple.....	68
Figura 5-20: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 20 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente.....	69
Figura 5-21: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme .....	69
Figura 5-22: Rendimiento de los algoritmos en una red de 20 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple .....	70
Figura 5-23: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 20 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente .....	70
Figura 5-24: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial .....	71
Figura 5-25: Rendimiento de los algoritmos en una red de 20 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple .....	71
Figura 5-26: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 20 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente .....	72
Figura 5-27: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto.....	72
Figura 5-28: Rendimiento de los algoritmos en una red de 50 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple.....	73
Figura 5-29: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 50 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente.....	74
Figura 5-30: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme .....	74

Figura 5-31: Rendimiento de los algoritmos en una red de 50 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple .....	75
Figura 5-32: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 50 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente .....	76
Figura 5-33: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial .....	76
Figura 5-34: Rendimiento de los algoritmos en una red de 50 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple .....	77
Figura 5-35: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 50 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente .....	77
Figura 5-36: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto.....	77
Figura 5-40: Representación de los radios de cobertura de los nodos .....	78
Figura 5-41: Representación de una red de árbol de 50 nodos con la base en un extremo	79
Figura 5-42: Rendimiento del algoritmo CF aplicado a una red de topología arbórea con la base en un extremo del mapa .....	80
Figura 5-43: Representación de una red de árbol de 50 nodos con la base en el centro....	80
Figura 5-42: Rendimiento del algoritmo CF aplicado a una red de topología arbórea con la base en el centro del mapa .....	81

# Índice de tablas

Tabla 2-1: Taxonomía de protocolos de encaminamiento basados en posición.....	22
Tabla 2-2: Características de los protocolos MAC .....	28
Tabla 3-1: Consumo de corriente de MCU .....	35
Tabla 3-2: Consumo de corriente y tiempo empleado para los accesos a memoria .....	36
Tabla 3-3: Corriente consumida por recibir y transmitir .....	42



# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

Durante las dos últimas décadas se ha registrado un gran progreso en el ámbito de miniaturización de circuitos electrónicos y elementos de comunicación inalámbrica que ha permitido la aparición de lo que se denomina “redes de sensores”.

Estas redes son la puerta de entrada a un sinfín de aplicaciones para todos los ámbitos. Tanto es así, que ha sido declarada una de las diez tecnologías actuales que cambiarán el mundo, según el instituto tecnológico de Massachusetts [1].

Para poder entender el significado y la utilidad de estas redes, se plantea imprescindible la definición del término *sensor*.

Se llama sensor a cualquier elemento capaz de detectar la presencia o cambio de algún factor físico o químico de su entorno. Más concretamente, en este proyecto se utilizarán sensores electrónicos, que son dispositivos capaces de transformar las magnitudes medidas en variables eléctricas. A partir de este momento, siempre que se mencione la palabra *sensor* nos estaremos refiriendo a un sensor electrónico.

Como se puede apreciar en el siguiente listado, son muchas las magnitudes que un sensor puede medir, y aun más la cantidad de aplicaciones que tienen.

- Temperatura
  - Termómetros utilizados en el área sanitaria.
  - Termostatos para sistemas de calefacción.
- Distancia
  - Avisadores de proximidad en vehículos.
  - Utensilios de medida de dimensiones.
- Aceleración
  - Sistemas de prevención de daños contra caídas en aparatos electrónicos delicados (bloqueo automático de las partes delicadas, como el brazo móvil del disco duro).
- Intensidad luminosa
  - Sistemas de alumbrado automático que se encienden al detectar poca luz.
- Movimiento
  - Cámaras de seguridad.
  - Sistemas de defensa.
- Inclinación
  - Teléfonos móviles con pantalla orientada automáticamente.
  - Automóviles con ayuda al arranque y la frenada en cuestas pronunciadas.
- Humedad
  - Cámaras para conservación de alimentos.
- Densidad
  - Fabricación de materiales.
  - Control de fluidos.

En cuanto a las variables eléctricas en las que estas medidas se transforman, pueden ser de varios tipos, como cambios de resistencia eléctrica, capacidad, tensión o corriente.

Existen varias formas de explotar el potencial de los sensores. La más sencilla es mostrar directamente de forma visual el valor medido. Otros sistemas más complejos disponen de una unidad de computación que es capaz de utilizar los datos obtenidos en una aplicación más elaborada, como por ejemplo los sistemas de alarma, que se activan cuando la medida dada por el sensor sobrepasa o es inferior a un umbral establecido. Sin embargo, aun en este caso el sensor sigue actuando como un mero transductor de información, que provee con los datos que mide al procesador central.

No obstante, el modo de uso de los sensores que se abordará en el presente documento es su despliegue en redes inalámbricas. Una red inalámbrica de sensores está compuesta por un conjunto de nodos que tienen tanto capacidad de sensado como equipamiento para la comunicación sin cable. De este modo, la información tomada por cada sensor es enviada de nodo a nodo hasta llegar a la estación base, donde habrá una unidad de computación encargada de almacenar los datos recibidos, así como, en muchos casos, controlar la inteligencia de la red.

El término designado para nombrar a los sensores inalámbricos es *mota*, del inglés, ‘mote’, y es el que se empleará de aquí en adelante para referirse a ellos. Del mismo modo, se utilizan muy comúnmente las siglas WSN para referirse a una red de sensores inalámbricos, del inglés, *Wireless Sensor Network*.

Gracias a la gran variedad de magnitudes que un sensor puede medir, las redes de sensores presentan un gran potencial para su aplicación en tres campos principales.

- **Monitorización del entorno.** Se toman medidas durante largos periodos de tiempo en entornos que pueden ser hostiles o incluso inaccesibles para el ser humano. Posteriormente estas medidas pueden ser utilizadas por científicos para evaluar datos como la evolución de microclimas, cambios en los niveles de contaminación del agua, o el estado de plantaciones agrícolas.  
La topología de red en este caso suele ser estática, y los datos obtenidos se almacenan para su posterior tratamiento.
- **Monitorización de seguridad.** Estas redes se despliegan para detectar en tiempo real anomalías en un entorno controlado. Algunas aplicaciones que utilizan redes de este tipo son los sistemas de detección de incendio, alarmas antirrobo, o sistemas militares.  
Son redes de topología estática, y su información es de tipo crítico, es decir, debe ser tratada con la mayor brevedad posible.
- **Monitorización de emplazamiento (Seguimiento o *Tracking*).** Comúnmente utilizadas para el control de población o la localización de un ente móvil (rastreo de vehículos o localización de animales en peligro de extinción), son redes de topología dinámica, en las que cada nodo puede ser reubicado en cualquier momento.

## 1.1. Motivación

La capacidad inalámbrica de las motas aporta una gran ventaja, que es su libre disposición en el terreno, ya que se pueden evitar los problemas del despliegue del cableado. Sin embargo, si se suprime el tendido de cables y se dejan los sensores desconectados de la red eléctrica surge un importante inconveniente, y es que su funcionamiento pasa a depender de una batería con una carga limitada, por lo que cada acción de la mota acorta sensiblemente su tiempo de vida.

Por tanto, desarrollar métodos de ahorro de energía es un trabajo importante para prolongar la vida de las redes de sensores inalámbricos cuando éstos funcionan de forma autónoma con las baterías de las que disponen.

Son varios los elementos que consumen la batería de las motas. Algunos, como la energía disipada a través de las conexiones y resistencias de la placa, son inevitables, pero muy pequeños en comparación con los consumos más importantes producidos por los principales elementos hardware, muy a tener en cuenta a la hora de optimizar la duración de una batería.



**Figura 1-1: Arquitectura hardware de las motas**

En la Figura 1-1 se muestran los principales elementos que componen una mota, estando el procesador como elemento central, dado que es el encargado de coordinar al resto.

Tras el análisis que se realiza en el siguiente capítulo, se identificará el subsistema de comunicación inalámbrica como el elemento más crítico en cuanto a consumo de energía [2], [3], [4], [5], y, a la vista de los numerosos algoritmos y estrategias encontradas en la bibliografía para optimizar este gasto ([6], [7], [8], [9],[10], y[10], entre otras), se simularán algunos de ellos en condiciones representativas para después valorar los resultados obtenidos.

## 1.2. Objetivos

Una de las mayores ventajas que presentan las redes de sensores inalámbricos es la capacidad de recoger en un único emplazamiento (estación base) toda la información recogida por los sensores dispuestos a lo largo de una extensa área, para luego poder analizarla desde un punto de vista global, y muchas veces en tiempo real.

Para ello, es imprescindible que cada nodo de la red sea capaz de hacer llegar a la estación base la información que recoge, consumiendo de la forma más óptima posible la batería de la que dispone.

Se han propuesto en la literatura multitud de estrategias para ahorrar energía, como son las mejoras de diseño de las baterías, protocolos de encaminamiento eficientes en energía [11], programas de apagado temporal de las motas [12], protocolos MAC optimizados para el consumo de baterías [13], etc.

De entre todas ellas, son de especial interés para este proyecto aquéllas que incluyen en los nodos cierta capacidad para decidir si transmitir o no un mensaje en función de su importancia, referidas a partir de ahora como técnicas de comunicación selectiva.

En trabajos previos se pueden encontrar algoritmos de transmisión selectiva, como el algoritmo básico, que optimiza el consumo de un nodo sin tener en cuenta su entorno [6], y el algoritmo para transmisión en línea [8], pensado para su aplicación en redes de nodos dispuestos uno tras otro.



Estos algoritmos han sido ideados para ser óptimos bajo ciertas condiciones teóricas de operación, y considerando modelos relativamente idealizados de sensor, que no siempre son próximos al sistema de operación real de estos dispositivos.

Con esta información, se perfilan los principales objetivos de este proyecto, que serán:

- Definición de un entorno de simulación lo más parecido posible a los escenarios reales, con datos que aproximen las especulaciones teóricas al comportamiento real que tendría el algoritmo bajo estudio en una situación real.  
La definición de este entorno incluye la obtención de datos de consumo de dispositivos comerciales representativos, por lo que será conveniente tomar como referencia productos utilizados con relativa frecuencia en aplicaciones reales.
- Diseño e implementación de los algoritmos de referencia con herramientas que permitan la posterior simulación de los mismos.
- Simulación de los algoritmos implementados utilizando los datos obtenidos en primer lugar, generando así resultados de los modelos teóricos aplicados a entornos reales.
- Extracción de conclusiones a la luz de los datos devueltos por las simulaciones, priorizando un algoritmo ante otro en función del escenario bajo análisis.

## 1.3. Fases del desarrollo

El trabajo que precede al desarrollo de las simulaciones llevadas a cabo tiene su antesala en el estudio tecnológico entregado por el autor de este mismo documento, “Análisis de los sensores Imote2”. En él se procuró un análisis de capacidades y consumos de los sensores Imote2, así como una pequeña guía de puesta en marcha.

El punto de partida de este proyecto fue el análisis en profundidad de los avances llevados a cabo hasta la fecha en cuanto a estrategias de descarte de mensajes para optimizar el tiempo de vida de sensores inalámbricos. El objetivo se perfiló entonces como el diseño de entornos de simulación que permitieran ratificar o mejorar dichas estrategias para distintos escenarios más realistas.

Para ello, se realizó un estudio de los distintos parámetros que definen una red de sensores, como su topología o el protocolo de comunicación empleado. En este documento se engloba en el Capítulo 2: Estado del arte.

Para comenzar con el trabajo de evaluación, se concibió un modelo de simulación de alto nivel adaptable por parámetros a los distintos tipos de redes que se pretendía analizar.

En las fases subsiguientes se implementaron los distintos algoritmos de transmisión selectiva. Tras ello, se realizaron las simulaciones pertinentes bajo distintas condiciones de aplicación.

Al final, con los datos obtenidos fue posible deducir conclusiones acerca del uso de las estrategias contempladas, demostrando su validez o falta de utilidad para cada escenario definido.

Como trabajo final se denota la elaboración de la memoria que recoge los distintos análisis y procedimientos llevados a cabo anteriormente, conformando de esa forma este documento.

### 1.4. Medios empleados

Para la ejecución de este proyecto se tuvieron en cuenta varias herramientas de desarrollo, aunque al final todo el trabajo se llevó a cabo sobre Matlab.

La primera opción era utilizar hardware en tiempo real, ya que se disponía de varias unidades de sensores inalámbricos Imote2. El uso de estos dispositivos permitiría probar los algoritmos en un entorno real, pero presenta un inconveniente, y es que era absolutamente necesario llevar un control exhaustivo del nivel de batería de cada nodo. Además, y dado que en cada simulación es necesario agotar la batería, el tiempo requerido hubiera sido demasiado alto.

Por otro lado, el uso de software de simulación permite evaluar los algoritmos en cuestión sobre redes de cientos de nodos, sin necesidad de disponer de tantas unidades hardware.

Hay disponible un software de simulación en tiempo real y escalado (el tiempo de simulación sería  $n$  veces más rápido que el real). En este caso la metodología consiste en programar la aplicación tal y como se haría para una mota real (escrito en el lenguaje de programación nesC [14], ya que es compatible con el sistema operativo TinyOS [15]), y luego un simulador, TOSSIM [16], sería el encargado de ejecutarlo. Después, con la herramienta TinyViz, implementada sobre Java, se podía representar visualmente la localización y el paso de mensajes entre las motas. El nivel de batería estaría en este caso representado por un número entero que iría disminuyendo su valor durante la ejecución.

Por último, se consideró el empleo de Matlab, una herramienta software de tiempo no real. Se priorizó su uso porque, al igual que con TosSim y TinyViz, se pierde el realismo en las simulaciones, pero Matlab ofrece un manejo mucho más sencillo y una funcionalidad más potente en cuanto a tiempo de procesado.

### 1.5. Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura del presente documento, se proporciona a continuación el esquema general, con una descripción básica de los contenidos de cada capítulo.

- **Capítulo 1: Introducción y objetivos**

En este capítulo de introducción se presenta la tecnología en la que se basan todos los estudios, análisis y evaluaciones contenidas en este documento, las redes de sensores inalámbricos.

La problemática abordada es el consumo de energía producido por el intercambio de mensajes entre motas cuando éstas no tienen acceso a una red de alimentación, lo que lleva a la motivación y objetivo del proyecto, que es el estudio de las comunicaciones selectivas para optimizar este consumo.

- **Capítulo 2: Estado del arte**

A lo largo de este capítulo se resumen las distintas configuraciones y consideraciones posibles a la hora de simular una red de sensores inalámbricos, mencionando las distintas posibilidades encontradas en la bibliografía para cada una, y definiendo la influencia de cada elección en el consumo de energía producido por el intercambio de mensajes de forma inalámbrica, en base a los resultados obtenidos en otros trabajos previos.

Es importante ubicar el punto en el que se encuentra actualmente el estudio de comunicaciones selectivas, los resultados que se han obtenido hasta ahora, y los entornos que, con las herramientas escogidas, merecerían una especial atención.

- **Capítulo 3: Caracterización de los sensores inalámbricos**

Las simulaciones realizadas en este proyecto pretenden devolver los resultados más cercanos posibles al caso de aplicación real. Para ello, es importante estudiar el comportamiento del hardware real, y así poder parametrizar adecuadamente cada simulación.

En este capítulo se detallan los componentes que forman las motas, estados de funcionamiento, y consumos asociados a estas características.

- **Capítulo 4: Análisis e implementación**

Se describe en este apartado el funcionamiento del software de simulación empleado y las decisiones de diseño implicadas. Se detalla también hasta qué punto los estudios realizados en los capítulos anteriores han podido ser implementados debido a las limitaciones del entorno de simulación o de los propios algoritmos.

- **Capítulo 5: Escenarios y resultados**

En este capítulo se pueden encontrar las gráficas extraídas de las simulaciones, organizadas en función de las características de la red simulada, y de las distribuciones de probabilidad de importancia de los mensajes retransmitidos.

- **Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras**

Tras el análisis en profundidad llevado a cabo en el capítulo anterior, es posible determinar algunas conclusiones, datos probados empíricamente que aplicados a una red de sensores permitirán alargar su vida útil.

Además, estas conclusiones servirán como punto de partida de nuevas investigaciones, ya sea elaborando escenarios más complejos basados en los utilizados en este proyecto, o aplicando técnicas más avanzadas a las mismas situaciones.

- **Capítulo 7: Presupuesto**

Aquí se detalla el presupuesto estimado del proyecto, incluyendo el coste en horas del personal empleado, material fungible y amortización de herramientas.

También se incluye un diagrama de Gantt en el que se esquematizan los tiempos dedicados a cada fase de desarrollo.



# Capítulo 2

## Estado del arte

Las redes de sensores inalámbricos han sido objeto de estudio para muchos expertos durante la última década, por lo que a día de hoy existe un gran volumen de información disponible en este campo, y documentación sobre los distintos análisis y avances que se han conseguido en cuanto a consumo y optimización de energía.

El estudio de optimización de energía en redes de sensores inalámbricos abarca varios ámbitos, pues al ser un sistema compuesto por multitud de elementos son muchos los parámetros que se pueden alterar para poder conseguir una mayor eficiencia energética.

En este capítulo se presenta el estado del arte para los distintos posibles ámbitos de estudio, con especial atención al que es objetivo principal de este proyecto, el descarte selectivo de mensajes.

Se describe entonces a continuación el fundamento teórico que hay tras los algoritmos de comunicación selectiva, las posibles topologías o configuraciones de una red, protocolos de encaminamiento entre nodos, protocolos MAC aplicables a estos entornos, y un sencillo modelo de pérdidas que permitirá el diseño de simulaciones más acordes con los sistemas reales.

## 2.1. Comunicaciones selectivas

### 2.1.1. Fundamento teórico de los algoritmos

La batería de los nodos es un recurso muy valioso en las redes de sensores inalámbricos, lo que impone graves limitaciones a las capacidades de los sensores, y tiene una fuerte influencia en el funcionamiento de la red a todos los niveles.

Muchos estudios han aplicado ya estrategias de comunicación selectiva para controlar el flujo de información que se transmite por la red, donde los mensajes son descartados si el coste energético de su transmisión no se compensa con la importancia de la información que porta. Esta idea se remonta al algoritmo IDEALS [17], y es la base de los sensores censuradores [18] y otros esquemas [19] de detección descentralizada. Recientemente, el problema de diseñar políticas eficientes de transmisión selectiva ha sido formulado bajo un marco estadístico y las herramientas de los Procesos de Decisión de Markov (MDP), como en [9] y [20].

Generalmente, al hacer estos diseños se asume que los costes energéticos de las tareas de los sensores y el nivel de batería son conocidos. También se considera que el consumo de batería correspondiente a transmitir es mucho mayor que el de recibir, ya que de otra forma los beneficios de descartar mensajes pueden ser despreciables.

Sin embargo, estas asunciones básicas no siempre resultan satisfechas en la realidad, pues el consumo medio por cada transmisión y recepción puede depender fuertemente en características del diseño de la red a todos los niveles (estrategias de control de potencia, el protocolo MAC escogido, influencia del entorno, etc.). Como consecuencia, la configuración de los parámetros libres en algoritmos de comunicación selectiva no puede llevarse a cabo por adelantado antes de desplegar la red, y deben utilizarse algunas reglas adaptativas en las medidas de consumo de energía.

#### 2.1.1.1. Modelo del sensor

Para el desarrollo del modelo de comunicación selectiva en [20], el estado de un nodo cualquiera en una época  $k$  viene caracterizado por dos variables:

- La reserva de energía:  $e_k$
- La importancia del mensaje que se tiene que transmitir:  $x_k$

Siendo  $k$  el número de veces que se ha decidido transmitir o no un mensaje.

La importancia  $x_k$  puede reflejar, por ejemplo, la prioridad, la relevancia de la información contenida o el nivel de calidad de información (QoI), y se asume que viene dada por la capa de aplicación al nodo que debe transmitir el mensaje. Esto quiere decir que un nodo podrá leer de forma instantánea la importancia de un mensaje antes de transmitirlo.

Asumiendo que el algoritmo de encaminamiento que se haya elegido define un conjunto de vecinos para cada nodo, de forma que cualquier mota a la espera de enviar un mensaje en el momento  $k$  tenga que tomar la decisión ( $d_k$ ) de enviarlo o no a alguno de sus vecinos. Se toma  $d_k = 1$  si el mensaje es transmitido, y  $d_k = 0$  si es descartado. De esta forma la regla de decisión será una función del estado del nodo:

$$d_k = d_k(e_k, x_k) \quad (2-1)$$

La notación que se aplicará desde este momento para denominar la energía consumida en cada estado de funcionamiento de los descritos en 3.1 es la siguiente:

- $e_T$ : Transmisión
- $e_R$ : Recepción
- $e_I$ : Idle
- $e_S$ : Sensar

Para simplificar cálculos y notación, siempre que un nodo no tenga que transmitir ningún mensaje se considerará que debe transmitir un mensaje con importancia  $x_k = 0$ .

### 2.1.1.2. Algoritmo Básico (LF)

Un transmisor selectivo puede descartar mensajes considerados de baja relevancia, dependiendo de sus reservas actuales de batería, con el propósito de ser capaz de transmitir mensajes más relevantes que puedan necesitar ser enviados en el futuro.

Se utilizará a partir de ahora el acrónimo *LF* (*Local selective Forwarding*) para referenciar este algoritmo, dado que cada nodo implementará el descarte de mensajes con el objetivo de maximizar la información que transmite al siguiente nodo.

En [20] se estudian estrategias de optimización para maximizar la suma de importancias transmitidas en los mensajes

$$t = \sum_{k=0}^{\infty} d_k x_k \quad (2-2)$$

Bajo la hipótesis de que la secuencia de importancias  $x_k$  es estacionaria, resulta que para valores muy altos de energía disponible,  $e_k$ , la regla de decisión que maximiza (2-2) puede expresarse:

$$d_k = u(x_k - \mu) u(e_k - e_R - e_T) \quad (2-3)$$

Donde  $u(\cdot)$  representa la función escalón duro y  $\mu$  es un umbral que en el caso general depende del valor  $e_k$ , pero para niveles de batería lo bastante elevados puede aproximarse por una constante, tal y como se expresa en las siguientes ecuaciones.

Luego, un transmisor selectivo cuasi-óptimo enviará un mensaje si y solo si dispone de energía suficiente ( $e_k \geq e_R + e_T$ ) y el valor de la importancia es mayor que el umbral,  $\mu$ .

El inconveniente de este método es el que se adelantaba en el subapartado anterior, y es que no existe una expresión cerrada para el cálculo de  $\mu$ , sino que es una expresión iterativa:

$$\mu = \rho \mathbb{E}\{(x_k - \mu)^+ | x_k > 0\} \quad (2-4)$$

Donde  $(z)^+ = zu(z) \forall z$ .

La expresión base para  $\rho$  está relacionada con los costes asociados a la decisión de transmitir o no un mensaje

$$\rho = \frac{\mathbb{E}\{c_1\} - \mathbb{E}\{c_0\}}{\mathbb{E}\{c_0\}} \quad (2-5)$$

Siendo  $\mathbb{E}\{c_1\}$  la esperanza del coste de decidir transmitir, y  $\mathbb{E}\{c_0\}$  la esperanza del coste de decidir no transmitir.

De esta forma, el parámetro  $\rho$  depende de los valores medios del nodo. Definiendo los patrones de consumo medio:

- $E_S = \mathbb{E}\{e_S\}$
- $E_R = \mathbb{E}\{e_R\}$
- $E_T = \mathbb{E}\{e_T\}$
- $E_I = \mathbb{E}\{e_I\}$

Y las probabilidades:

- $P_I$ : Probabilidad de estar en estado Idle
- $P_R$ : Probabilidad de recibir un paquete
- $P_S$ : Probabilidad de tomar una medida

Se obtiene que:

$$\rho = \frac{(1 - P_I)E_T}{P_I E_I + P_R E_R + P_S E_S} \quad (2-6)$$

Tomando el valor resultante de (2-6), y utilizando medias basadas en muestras anteriores, (2-4) puede reescribirse según la siguiente fórmula iterativa:

$$\mu_k = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \mu_{k-1} + \frac{\rho}{k} \cdot (x_k - \mu_{k-1})^+ \quad (2-7)$$

Hay que puntualizar que aunque únicamente la expresión de  $\mu$  aparece en una forma explícitamente iterativa, el valor de  $\rho$  debe ser actualizado también en cada iteración, en tanto que depende de los valores de energía actuales del nodo, que son estimados de forma adaptativa.

Este algoritmo está ideado para una topología muy simple basada en un transmisor y un receptor. Dado que existen casos de aplicación con redes bastante más grandes y complejas, resulta interesante estudiar también el siguiente algoritmo.

### 2.1.1.3. Algoritmo Cooperativo (GF)

En una red multisalto, la implementación de una estrategia de comunicación selectiva se convierte en un problema más complejo, puesto que la decisión de enviar o no un mensaje requerirá la coordinación con el resto de nodos asignados a ese camino de transmisión hasta la estación base. El requisito heredado de esta coordinación es la distribución de la información de estado de cada nodo a lo largo de la red.

Se utilizará a partir de ahora el acrónimo *GF* (*Global selective Forwarding*) para referenciar este algoritmo, dado que cada nodo implementará el descarte de mensajes con el objetivo de maximizar la información que llega a la estación base.



El modelo de red utilizado para entender este algoritmo es una colección de nodos  $\mathcal{N} = \{n | n = 1, \dots, N\}$  y una estación base (nodo  $N+1$ ) hacia donde serán dirigidos todos los mensajes.

Se define el vector de estado de la red en función de los vectores que agrupan las dos variables anteriores:  $\mathbf{s}_k = (\mathbf{e}_k, \mathbf{x}_k)$ . Este vector  $\mathbf{s}$  contiene toda la información necesaria para tomar una decisión de descarte en cada época  $k$ .

Si se utilizara una optimización independiente para cada nodo, aplicando el algoritmo LF, se conseguiría un conjunto de nodos optimizados, pero eso no implica que la eficiencia global sea óptima [20].

Para conseguir maximizar la importancia de mensajes que llegan a la estación base desde toda la red, el objetivo es optimizar el tiempo de vida del nodo que se agota primero, y por consiguiente, el tiempo de funcionamiento de la red. Este nodo se asume que siempre es el penúltimo de la cadena (el enlace del resto de la línea con la estación base), basándose en que será el que tenga más actividad, dado que tendrá que retransmitir los mensajes de toda la red, además de los suyos propios.

Este algoritmo adquirirá por lo tanto su mayor potencial aplicado a redes en línea (2.2.2.1), donde cada nodo tendrá un receptor único ( $i + 1$ ) para sus mensajes, al igual que sólo podrá recibir desde un nodo en concreto ( $i - 1$ ).

Bajo estas condiciones, los únicos datos de entrada relevantes para el algoritmo serán los de ese último nodo (*nodo N*) antes de la base, por lo que todos los nodos utilizarán un umbral de descarte común, calculado a partir del estado de  $N$ .

Manteniendo la definición para  $\mu$  de (2-4), bastaría con actualizar la expresión para  $\rho$ :

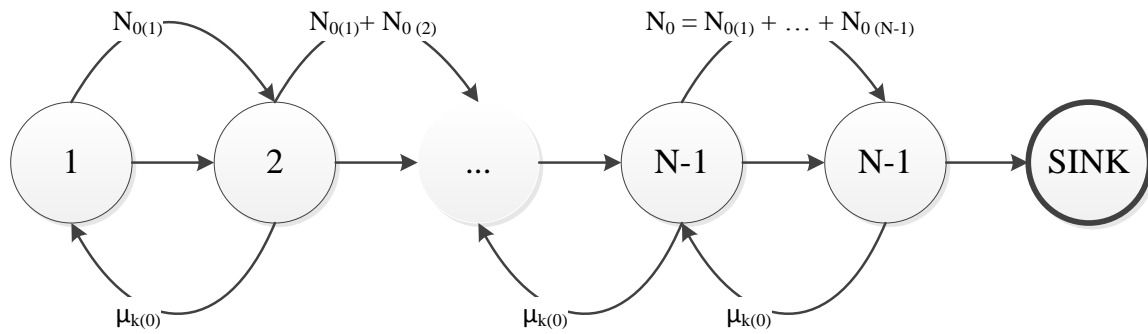
$$\rho = \frac{\bar{P}_i E_i + (1 - \bar{P}_i)(E_t + E_r)}{E_i(1 - P_{S_N}) + P_{S_N} E_s} - 1 \quad (2-8)$$

Donde  $\bar{P}_i$  es la probabilidad global de estado idle, y  $P_{S_N}$  es la probabilidad de que el nodo  $N$  sea la fuente del mensaje.

Con esta información, se infiere la nueva expresión para  $\mu$ , que se calcula de forma iterativa a partir de:

$$\mu_k = \frac{k_0}{k} \mu_{k_0} + \frac{\rho}{k} (x_k Q(x_k) - \mu_{k_0})^+ \quad (2-9)$$

Donde  $k_0$  es la última época en la que el umbral fue actualizado, y  $k$ , en lugar de  $k+1$ , como en el caso LF, será esa cantidad añadiendo todas las veces que un mensaje ha sido descartado, por lo que  $k = k_0 + 1 + N_0$ .



**Figura 2-1: Protocolo de difusión de información para el algoritmo cooperativo**

Para la difusión de estos mensajes es posible reutilizar o añadir campos a los mensajes, incluyendo  $N_i$  en los mensajes de información, y  $\mu_k$  en los ACK, por ejemplo.

### 2.1.2. Evaluación de los algoritmos

La evaluación de estos algoritmos permite valorar la mejora que podría suponer la implementación de estas estrategias de comunicaciones selectivas, ya sea en su totalidad o parcialmente con alguna adaptación.

En la bibliografía se encuentran algunas referencias donde se comienza con este trabajo de evaluación. En el caso de [20], se hacen experimentos con motas reales, por lo que los resultados obtenidos son muy fiables, aunque las pruebas se llevan a cabo en redes muy sencillas debido a las dificultades físicas que una implementación real conlleva.

Las herramientas de simulación escogidas para este proyecto van a aportar varias ventajas. Entre ellas, su potencia de cálculo permitirá simular redes mucho más grandes y complejas en cuanto a número y disposición de los nodos, obteniendo además un promedio de distintas ejecuciones que añadirá verosimilitud al resultado.

Además, aunque en algunos trabajos previos [7] se hayan realizado pruebas con hardware real, sigue habiendo diferencias con respecto a un despliegue real, como son el uso de protocolos MAC y enrutamiento concretos, o distintos canales de transmisión con sus modelos de pérdida asociados.

Surge entonces la necesidad de acercar los resultados de estas primeras pruebas a la complejidad de los entornos reales, siendo un primer paso la simulación en entornos de tiempo no real como Matlab.

## 2.2. Topologías de red

Se llama topología de red al modelo según el cual se distribuyen en el espacio los nodos de una red. Este modelo afecta tanto a la ganancia en transmisión y en recepción que se necesitará para establecer la comunicación, como a la ruta y el número de nodos por el que pasará un mensaje hasta llegar a la estación base.

A la hora de desplegar una red de sensores inalámbricos, la topología de red utilizada es uno de los factores clave para optimizar su autonomía. Una elección incorrecta puede llegar a originar graves problemas, desde un consumo de batería sub-óptimo en toda la red, hasta la pérdida de conectividad con varios sensores que cubran un área concreta.

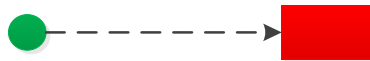
En este análisis de las redes de sensores inalámbricos se han tenido en cuenta una serie de topologías de red, y se ha realizado un estudio individualizado para cada una de ellas, dado que la distribución de mensajes enviados y transmitidos cambia sensiblemente en función de la topología utilizada.

### 2.2.1. Topologías monosalto

Se llaman redes monosalto aquéllas cuyos nodos no necesitan retransmitir ningún mensaje, dado que todos ellos están lo bastante cerca de la estación base como para que su radio de cobertura sea capaz de alcanzarla.

#### 2.2.1.1. Red de dos nodos

Una red de dos nodos es el formato más sencillo que se puede desplegar. Consta simplemente de una mota que se encarga de tomar los datos, y enviarlos a la estación base, que está dentro de su radio de cobertura.

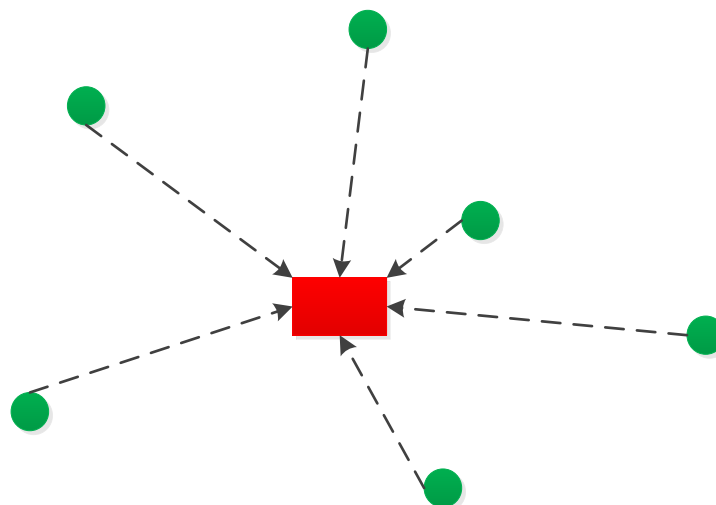


**Figura 2-2: Red de dos nodos: Transmisor (verde) y estación base (rojo)**

Se refleja en este apartado esta red simple porque será el punto de partida sobre el que se empiecen a implementar las simulaciones de algoritmos de comunicación selectiva.

#### 2.2.1.2. Topología en estrella

En este caso, todos los nodos se encuentran dentro del radio de cobertura de la estación base, por lo que el consumo dedicado a los recursos radio será exclusivamente para el caso de transmisión.



**Figura 2-3: Topología en estrella**

La ventaja de estas redes es su bajo consumo de energía, dado que los mensajes no necesitan ser retransmitidos para llegar al destino, llegan en un único salto.

La contrapartida, es una mayor complejidad a la hora de manejar colisiones, ya que todos los nodos comparten destino. Esto puede provocar tiempos de espera muy altos si el número de nodos es demasiado elevado. Además, no permite redundancia, es decir, que no hay caminos alternativos por donde la información pueda llegar a su destino en caso de fallo del enlace principal.

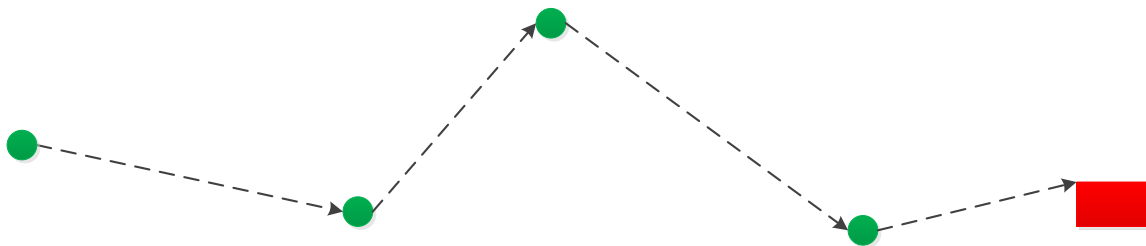
### 2.2.2. Topologías multisalto

Cuando la distancia a cubrir es demasiado grande como para llegar a la estación base con un solo salto, es necesario incluir más nodos retransmisores que permitan ampliar el rango efectivo de la comunicación.

Estos nodos, pueden o no ser también sensores, por lo que pueden convertirse en nuevas fuentes de mensajes.

#### 2.2.2.1. Topología en línea

Un despliegue de red en línea es el caso más sencillo que se va a estudiar. En este caso, los nodos se distribuyen de tal forma que el camino óptimo de los mensajes es atravesar todos los nodos que hay entre el sensor que ha tomado el dato a enviar y la estación base.



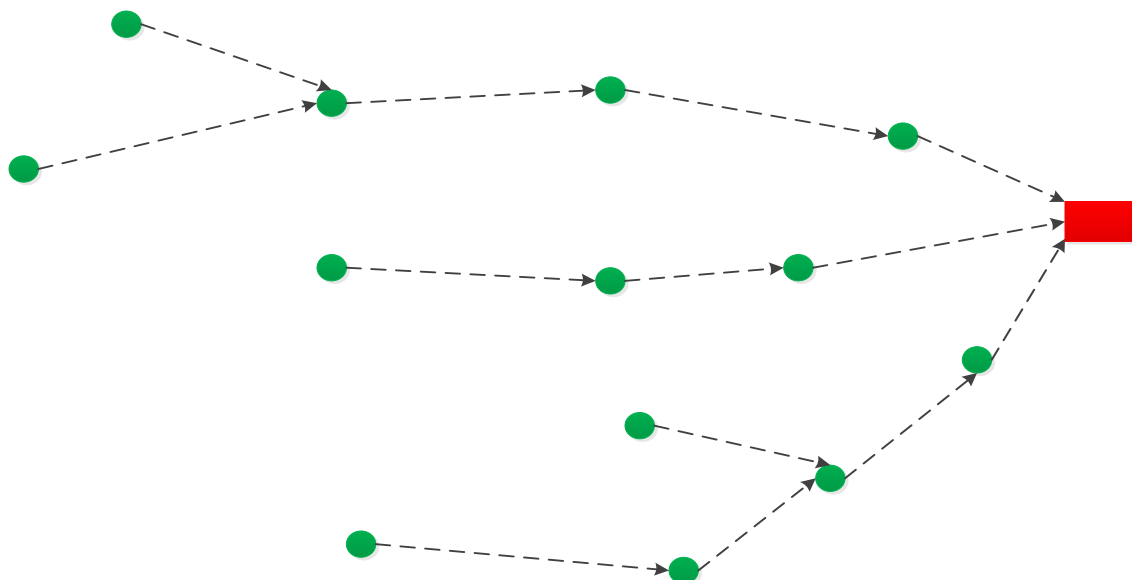
**Figura 2-4: Topología en línea**

Un ejemplo de aplicación real en la que esta topología sería la más válida es una red de sensores colocados a lo largo de un puente para controlar su nivel de vibración, a partir de los datos tomados por los acelerómetros.

Como caso concreto de una red en línea se deben tener en cuenta las redes con tan solo dos nodos, uno con el sensor que tomará los datos, y la estación base. Y es que aunque su uso sea algo poco común, los algoritmos básicos de optimización surgen en torno a este tipo de redes.

#### 2.2.2.2. Topología en árbol

Si se implementa una topología de este tipo, cada nodo enviará sus mensajes a través de un camino distinto, pudiendo ser necesario que sea retransmitido por varios nodos intermedios antes de llegar a la estación base.



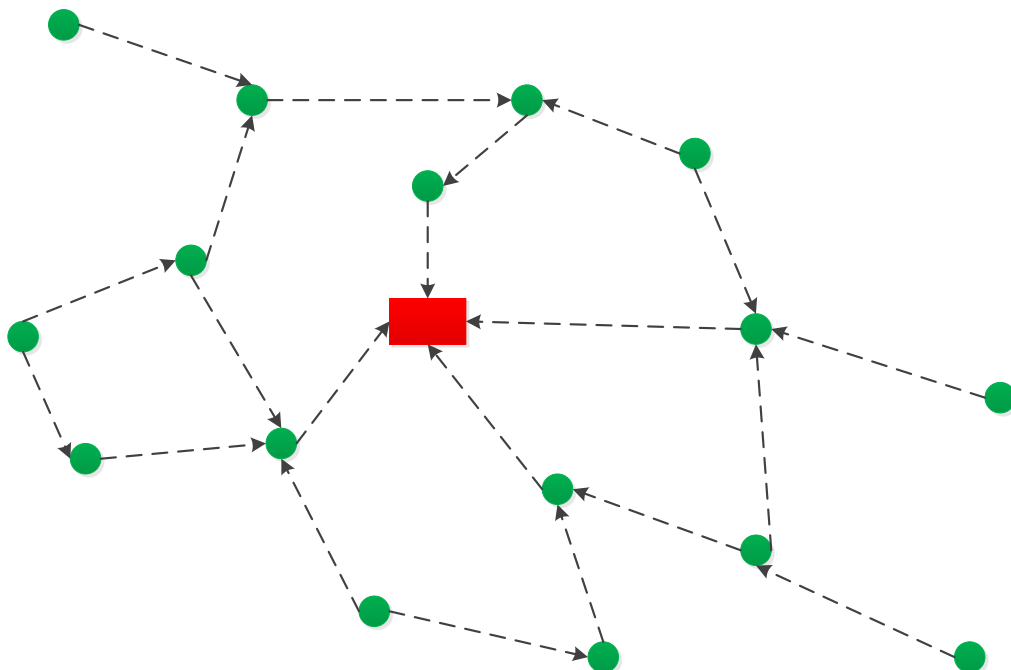
**Figura 2-5: Topología en árbol**

En la Figura 2-5 se puede apreciar gráficamente la disposición de los nodos en una red con topología arbórea, así como el destinatario de los mensajes de cada nodo.

Se trata de una distribución muy útil para situaciones en las que debe cubrirse una gran área y la estación base queda situada en un extremo. Sin embargo, presenta algunos problemas, como la posibilidad de colisiones de mensajes, que se da siempre que un nodo puede ser destinatario de mensajes provenientes de más de un emisor.

### **2.2.2.3. Topología en malla**

Se trata de la topología más compleja que se puede desplegar. De hecho, actualmente es uno de los retos para las tecnologías inalámbricas emergentes, como WiMAX o LTE, y se está invirtiendo un gran esfuerzo en su desarrollo, dadas sus ventajas.



**Figura 2-6: Topología en malla**

Una topología en malla permite una red multisalto, donde cada nodo es capaz tanto de transmitir como de recibir mensajes para luego reenviarlos.

La mayor ventaja que presenta es que los mensajes tienen varios caminos posibles para llegar a la estación base, lo que hace de estas redes unos sistemas muy robustos frente a caídas en algún enlace.

Además, la red puede crecer de manera casi ilimitada, dado que para insertar un nuevo elemento basta con que éste se encuentre dentro del radio de cobertura de cualquiera de los nodos de la red. Sin embargo, la configuración de la red es muy complicada, dado que requiere mecanismos de descubrimiento automático de dispositivos, y una tabla de rutas adaptativa.

### 2.2.3. Elección de la topología

Para un caso en el que los nodos puedan situarse con libertad, los parámetros presentados a continuación, tomados de [21], permitirán diseñar una red, en función del número de nodos y la distancia entre ellos, que emplee la menor cantidad posible de energía para hacer llegar cada mensaje a su destino.

En una red monosalto, como por ejemplo una topología en estrella (ver 2.2.1.2), es posible calcular la distancia entre nodos que hace que, manteniendo la topología de la red, los nodos puedan cubrir la mayor área posible de una forma eficiente. Si la distancia a cubrir fuera mayor sería necesario emplear otros nodos para retransmitir los mensajes (red multisalto).

Según el modelo presentado, las potencias consumidas en transmisión y recepción se pueden escribir como sigue:

$$P_T(d) = P_{T0} + P_{Tx}(d)/\eta \quad (2-10)$$

$$P_R = P_{R0}$$

Para añadir la influencia del canal de transmisión, tan sólo se han tenido en cuenta las pérdidas por propagación en el espacio libre, despreciando otras más complejas como los desvanecimientos o el multitrayecto. Por ello se puede expresar la potencia recibida como:

$$P_{Rx} = P_{Tx}/(A \cdot d^\alpha) \quad (2-11)$$

Donde  $A$  es un factor que dependerá de las antenas utilizadas,  $d$  la distancia y  $\alpha$  un parámetro que dependerá del terreno (será 2 para espacio libre y se irá incrementando por cada obstáculo que haya en el trayecto).

Combinando (2-10) y (2-11) se puede determinar la potencia consumida por el sistema de comunicaciones inalámbrico para un entorno radioeléctrico dado:

$$P_T(d) = P_{T0} + \frac{P_{Rx} \cdot A \cdot d^\alpha}{\eta} \quad (2-12)$$

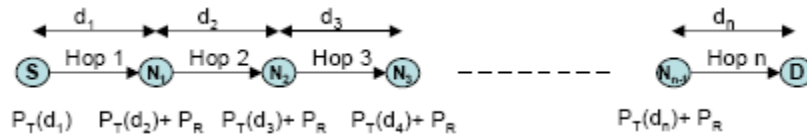
La potencia mínima requerida en los bornes del receptor ( $P_{R_{x-min}}$ ) viene dada por la SINR (*Signal to Interference and Noise Ratio*), o relación señal a ruido e interferencia. A partir de este valor se define la constante  $\varepsilon = P_{R_{x-min}} * A$ , con la que se reescribe (2-12) como:

$$P_T(d) = P_{T0} + \frac{\varepsilon \cdot d^\alpha}{\eta} \quad (2-13)$$

Si la ecuación (2-13) se aplica a una red multisalto de topología en línea (Figura 2-7), la potencia consumida para enviar un mensaje se reformula finalmente como:

$$P(n) = (n-1)P_{R0} + nP_{T0} + \frac{\varepsilon}{\eta} \sum_{i=1}^n d_i^\alpha \quad (2-14)$$

Donde queda patente que la eficiencia del amplificador de potencia es un parámetro muy influyente en el consumo total necesario para enviar un mensaje.



**Figura 2-7: Implicaciones de consumo de una red lineal multisalto**

A partir de las ecuaciones obtenidas, es posible encontrar una forma de conseguir una mayor duración de las baterías optimizando la colocación de las motas, generando así una topología óptima en función de la potencia necesaria para transmitir y recibir mensajes.

Asumiendo que el radio de cobertura máximo  $R_{max}$  vendrá dado por la potencia máxima de la que una mota dispone para transmitir un mensaje ( $P_{max}$ ), siendo siempre  $R \leq R_{max}$ , y que la red sea de tipo 1-dimensional con  $n$  nodos equidistantes puestos en línea (Figura 2-8), la potencia empleada para transmitir un mensaje vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$P(n) = (n-1)P_{R0} + nP_{T0} + \frac{\varepsilon \cdot n \cdot (R/n)^\alpha}{\eta} \quad (2-15)$$

Que derivada e igualada a cero:

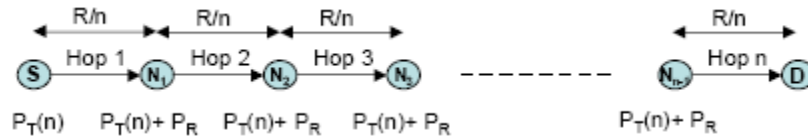
$$P'(n) = P_{R0} + P_{T0} - \frac{(n-1) \cdot \varepsilon \cdot R^\alpha}{\eta \cdot n^\alpha} = 0 \quad (2-16)$$

Considerando que  $\alpha > 1$  y que  $P(1) < P(2)$ , la curva  $P(n)$  solo tendrá un mínimo denotado  $n_0$ , lo que lleva al estudio de dos posibles casos:

Caso 1:  $n_0 \leq 1$ :  $P(1) < P(k)$  para todo  $k > 1$ .

Caso 2:  $1 \leq n_0 \leq 2$ :  $P(2) < P(k)$  y  $P(1) < P(k)$  para todo  $k > 2$ .

En consecuencia, el número óptimo de nodos para el traslado de un mensaje desde el origen hasta su destino será uno o dos.


**Figura 2-8: Topología en línea equidistante**

En el caso de que un único salto fuera más eficiente que dos, se cumpliría por tanto que  $P(1) < P(2)$ , que aplicado a (2-15) da como resultado:

$$P_{T0} + \frac{\varepsilon \cdot R^\alpha}{\eta} \leq P_{R0} + 2P_{T0} + \frac{\varepsilon \cdot R^\alpha}{2^{\alpha-1} \cdot \eta} \quad (2-17)$$

$$\varepsilon \cdot R^\alpha \leq \frac{(P_{R0} + P_{T0}) \cdot \eta}{(1 - 2^{1-\alpha})}$$

De (2-11) se obtiene que  $P_{Tx}(R) = \varepsilon \cdot R^\alpha$ , lo que permite expresar:

$$P_{Tx}(R) \leq \frac{(P_{R0} + P_{T0}) \cdot \eta}{(1 - 2^{1-\alpha})} = P_{equiv} \quad (2-18)$$

De este modo surge la expresión de  $P_{equiv}$ , que es la máxima potencia que puede consumir el amplificador de un nodo para que la transmisión en un único salto sea más eficiente que con dos saltos.

La expresión que denota la máxima distancia a la que podrán situarse dos nodos en un esquema de red monosalto queda como sigue:

$$R_s \leq \min \left( \sqrt[\alpha]{\frac{(P_{R0} + P_{T0}) \cdot \eta}{(1 - 2^{1-\alpha}) \cdot \varepsilon}}, \sqrt[\alpha]{\frac{P_{max}}{\varepsilon}} \right) \quad (2-19)$$

Como se dijo anteriormente, si  $R_s$  no es suficiente para cubrir todo el terreno, la red tendrá que ser multisalto, caso en el que se deberá optimizar tanto el número de nodos en un camino como la distancia entre ellos.

Con esta información, el siguiente paso en esta línea de actuación sería minimizar la energía consumida optimizando el número de saltos y el espacio recorrido en cada salto.

Si llamamos  $R$  a la distancia que hay entre el nodo origen y la estación base, y  $R_s$  a la distancia máxima que se puede recorrer en un solo salto, entonces el mínimo número de saltos necesario para recorrer toda la distancia será, redondeando al alza:

$$N_{h=R/R_s} \quad (2-20)$$

Las dos alternativas que se presentan ahora son, o asignar una distancia  $R_s$  a todos los saltos, excepto al último, que medirá  $l$ , o distribuir a partes iguales la distancia entre los  $N_h$  saltos necesarios.

Puede demostrarse de la siguiente manera que la segunda opción es la más eficiente.

Siendo  $P_{t\_max}$  el consumo de potencia requerido por el primer esquema, y  $P_{eq}$  el que necesita el segundo, y considerando que  $\alpha=2$ , se puede expresar:



$$P_{t\_max} = (N_h - 1)P_{R0} + N_h P_{T0} + (N_h - 1) \cdot \frac{\varepsilon \cdot R_s^2}{\eta} + \frac{\epsilon \cdot l^2}{\eta} \quad (2-21)$$

$$P_{t\_eq} = (N_h - 1)P_{R0} + N_h P_{T0} + N_h \cdot \frac{\varepsilon \cdot (R/N_h)^2}{\eta}$$

$$P_{t\_max} - P_{t\_eq} = \frac{\varepsilon \cdot R_s^2}{\eta} + \frac{\epsilon \cdot l^2}{\eta} - N_h \cdot \frac{\varepsilon \cdot (R/N_h)^2}{\eta} \quad (2-22)$$

Y dado que  $R = (N_h + 1)R_s + l$ , se puede desarrollar como:

$$\begin{aligned} P_{t\_max} - P_{t\_eq} &= (N_h - 1) \frac{\varepsilon \cdot R_s^2}{\eta} + \frac{\epsilon \cdot l^2}{\eta} - \frac{\varepsilon \cdot ((N_h - 1)R_s + l)^2}{\eta} \\ &= \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot \frac{N_h - 1}{N_h} \cdot (R_s - l)^2 \end{aligned} \quad (2-23)$$

De este último resultado se deduce que  $P_{t\_max} - P_{t\_eq} \geq 0$ , lo que implica que una red de sensores equidistantes, a una distancia  $R/N_h$ , será más eficiente que situados a distancia máxima.

## 2.3. Protocolos de encaminamiento

Cuando la topología de red empleada es alguna de las más complejas, como la de malla o la de árbol, y el número de nodos de la red es considerablemente alto, es imprescindible el uso de protocolos de encaminamiento que permitan un establecimiento automático de las rutas para los mensajes de cada mota.

Para el caso que aplica en este documento, se tendrá en especial consideración aquellos protocolos que utilicen la información de localización de las motas vecinas para establecer la tabla de rutas, ya que, como se comenta en 2.6, las simulaciones se llevarán a cabo para escenarios donde las motas permanezcan en un lugar fijo, y por lo tanto fácilmente conocido por sus vecinos sin necesidad de un intercambio constante de mensajes.

En la bibliografía se han encontrado numerosos métodos de encaminamiento basados en el conocimiento de la posición de los nodos vecinos, optimizados en términos de distintos parámetros, como el número de saltos, longitud del camino, coste energético o robustez.

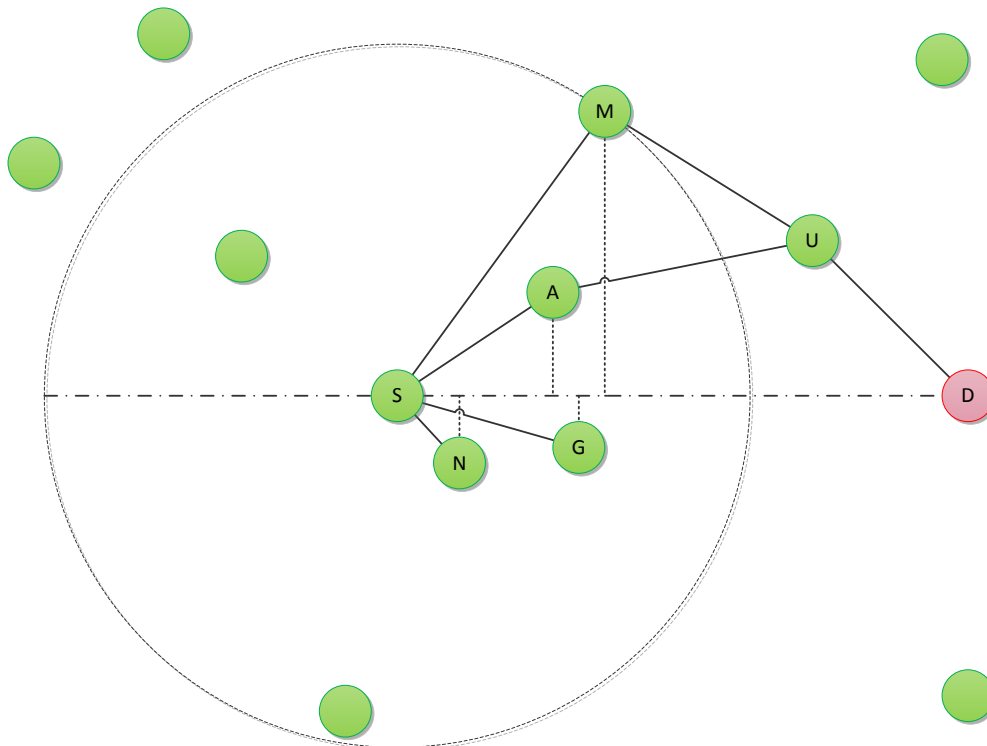
En la Tabla 2-1, extraída de [11], se encuentra una taxonomía de protocolos de encaminamiento basados en la posición de los nodos.

Método	Referencia
<i>Greedy</i>	[22]
MFR	[23]
Primera respuesta	[24]
Cobertura variable	[25]
GRA	[26]
Optimizado en coste energético	[27]
GFG	[28]
GFG Robusto	[29]

**Tabla 2-1: Taxonomía de protocolos de encaminamiento basados en posición**

Cuando una red utiliza un encaminamiento de tipo *greedy* (del inglés, ‘codicioso’), cada nodo intentará elegir como destinatario de sus mensajes aquél que más distancia le permita avanzar [22].

En un esquema de encaminamiento localizado, un nodo *S* preparado para enviar un mensaje conoce únicamente la localización de sus vecinos. En la Figura 2-9 se observan los distintos nodos de una red de ejemplo, siendo *D* la estación base.



**Figura 2-9: Ejemplos de encaminamiento de tipo *Greedy***

Para el caso *Most Forward within Radius* (MFR) [23], el progreso de un nodo A se define como la proyección en la línea que conecta S con D. El paquete de S es transmitido al nodo que mayor progreso presenta (en la Figura 2-9, M).

El *Nearest Forward Progress* (NFP) indica como dirección de avance el nodo más cercano (en Figura 2-9, N).

En [22] el esquema *greedy* propuesto elegiría G como nodo de avance, dado que sería el más cercano a D de todos los que están en el radio de alcance de S.

Los demás esquemas propuestos de la bibliografía tienen en cuenta un factor adicional, que permite optimizar de forma más adecuada este proceso. Hasta ahora, minimizar el número de saltos era sinónimo de minimizar la energía requerida, dado que la potencia transmitida por cada mota sería la misma. Sin embargo, si se considera que la potencia de transmisión fuera variable, el objetivo de la optimización pasa a ser el coste energético global en lugar del número de saltos.

Siguiendo esta idea, en algoritmos como el descrito en [27] se tiene en cuenta tanto el coste para llegar a un vecino B como el que necesitará B para llegar a D.

## 2.4. Protocolos MAC aplicables

Una vez que cada sensor conoce a quién debe enviar la información que recoge de forma que acabe llegando a la estación base, ya sea directamente o a través de varios saltos, es necesario definir un formato de mensaje y un modelo de gestión que permita una comunicación ordenada entre nodos.

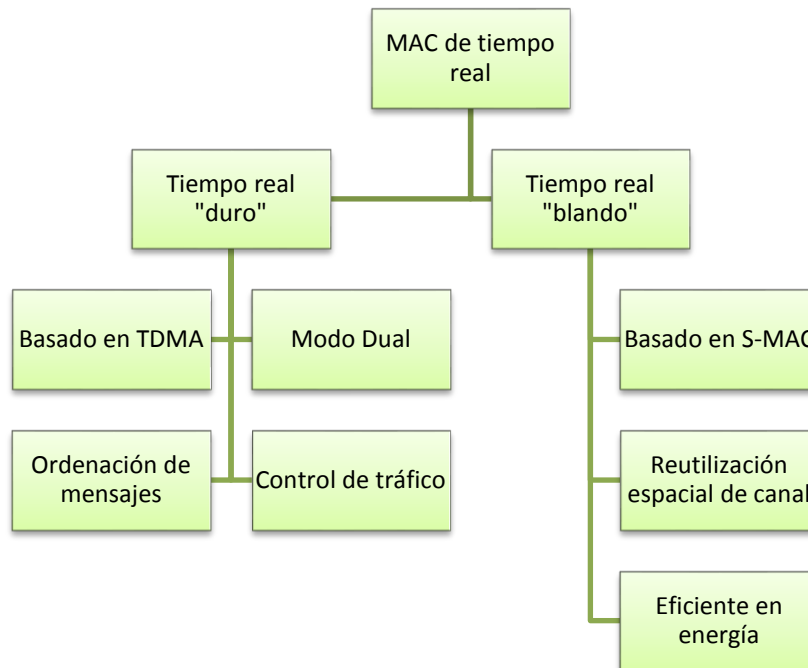
El protocolo MAC elegido será el encargado de gestionar el intercambio de mensajes entre nodos.

En función de la topología de la red, y la distancia entre nodos, será más adecuado un protocolo u otro. Una mala elección del mismo conllevará niveles de latencia subóptimos, e incluso un exceso de colisiones que provocará la necesidad de retransmisiones, con el consiguiente consumo extra de energía.

A continuación se muestran distintos protocolos MAC disponibles en la actualidad, generados con el propósito de disminuir el retardo producido por el tiempo que pasan los nodos escuchando el medio para evitar colisiones.

Los protocolos presentados son considerados de tiempo real, dado que están enfocados a aplicaciones críticas en tiempo, es decir, situaciones en las que los mensajes que lleguen tardíos pueden generar fallos graves en el sistema. Para ello, establecen una línea de tiempo en la que se marca cuándo debe ser enviado y transmitido cada mensaje, y están preparados para posibles picos de carga de mensajes.

Además de hacer que los mensajes lleguen en el tiempo requerido, hay protocolos MAC que tienen como prioridad el uso eficiente de la batería de las motas, como los que aparecen en las citas [30], [31], [32], [33], [34] y [35] de la bibliografía. La Figura 2-10 muestra la forma en la que se dividen los protocolos MAC de tiempo real presentados.



**Figura 2-10: Organización de los protocolos MAC de tiempo real**

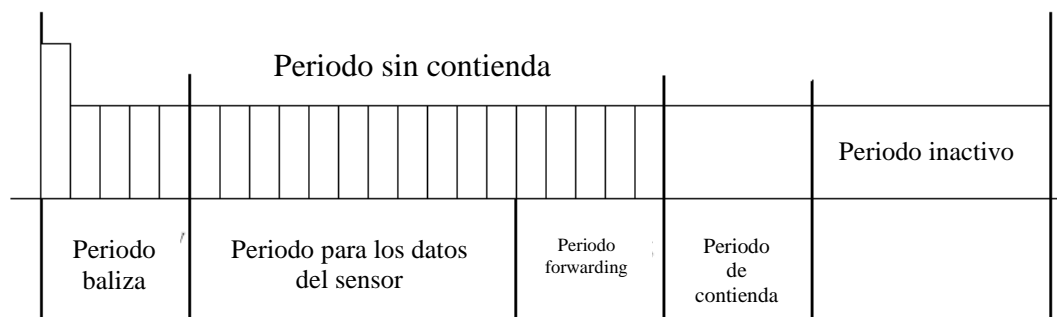
### 2.4.1. Protocolos MAC de tiempo real duro

- **Basado en TDMA**

RRMAC es un protocolo MAC de tiempo real duro. Propone una estructura arbórea en la que los paquetes pueden fluir continuamente desde los nodos en las hojas hasta la estación base englobados en una estructura de supertrama, como muestra la Figura 2-11. La señal de baliza se utiliza para sincronizar la red de sensores, los nodos ajustan su reloj cuando les llega la baliza y ejecutan el periodo sin contienda.

Este protocolo reduce el retardo asignando slots de tiempo a cada nodo (ya que está basado en TDMA, o *Time Division Medium Access*). Así, para una red que requiera multisalto, se nombran nodos coordinadores que tienen asignados un slot de tiempo para su baliza durante el periodo de baliza de la supertrama. De este modo, esta señal es transmitida a toda la red al comienzo de cada supertrama.

Los nodos son agrupados, de forma que solo el coordinador de cada grupo tiene capacidad para asignar slots de tiempo de la supertrama a otros nodos.



**Figura 2-11: Supertrama RRMAC**

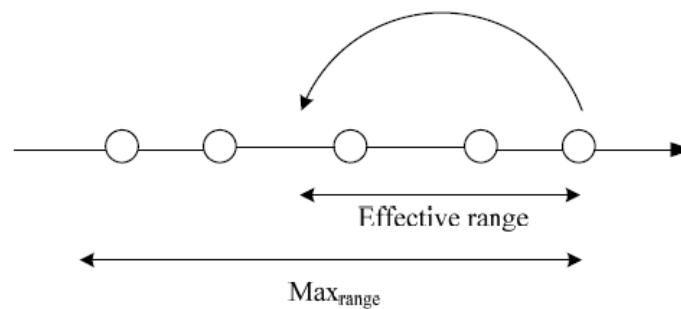
La principal dificultad que presenta este protocolo es la sincronización cuando la red está compuesta por un gran número de sensores distribuidos aleatoriamente.

- **Modo Dual**

Este protocolo define dos modos de funcionamiento, el protegido y el desprotegido.

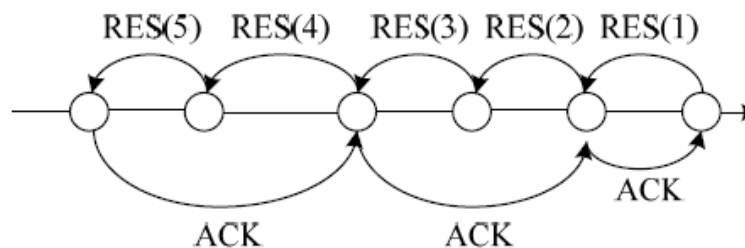
La Figura 2-12 muestra el modo desprotegido, donde  $\text{Max}_{\text{range}}$  es el rango máximo de comunicación de ese nodo.

Cuando un nodo recibe una señal de alarma por colisión, permanece inactivo un tiempo inversamente proporcional a la distancia del nodo donde nació la alarma.



**Figura 2-12: Modo desprotegido (MAC de tiempo real)**

En el modo protegido (Figura 2-13), se asegura que no habrá colisiones. Los nodos se agrupan en celdas, de forma que los nodos de una celda sean capaces de comunicarse con los nodos de otras dos celdas vecinas, y se utilizan mensajes de señalización para reservar las celdas entre el transmisor y el receptor.



**Figura 2-13: Modo protegido (MAC de tiempo real)**

Se llama modo dual porque siempre que se dé una colisión, la red puede pasar de modo desprotegido a modo protegido, perdiendo velocidad de transmisión pero ganando en robustez.

El inconveniente de este protocolo es que todos los nodos deben saber su posición absoluta desde el mismo momento en que se despliega la red.

- **Ordenación de mensajes**

El protocolo TOMAC proporciona un mecanismo de ordenación de mensajes que garantiza que se siga su orden temporal en redes monosalto de topología en malla donde todos los nodos compartan el mismo canal.

Los mensajes tienen una prioridad asignada, que aumenta siempre que el nodo es incapaz de transmitirlo debido a estar en estado inactivo o a que el canal esté ocupado. Cuando vuelve a tener la capacidad de mandar el mensaje, enviará siempre aquél con mayor prioridad de entre los que están esperando para ser enviados.

- **Control de Tráfico**

El objetivo de SUPORT es conseguir que cada paquete llegue a su destino antes de que deje de ser útil (*deadline*). Para ello, tiene en cuenta tanto el tiempo que resta para su *deadline* como el tiempo estimado de transmisión, según la siguiente ecuación:

$$L = \text{deadline} - (t_{el} + t_{snk} + D) \quad (2-24)$$

Donde  $t_{el}$  es el tiempo que ha pasado desde que el mensaje salió de su origen,  $t_{snk}$  es el tiempo que se estima que tardará en llegar a su destino, y  $D$  el tiempo que se estima que pasará antes de salir del nodo actual.

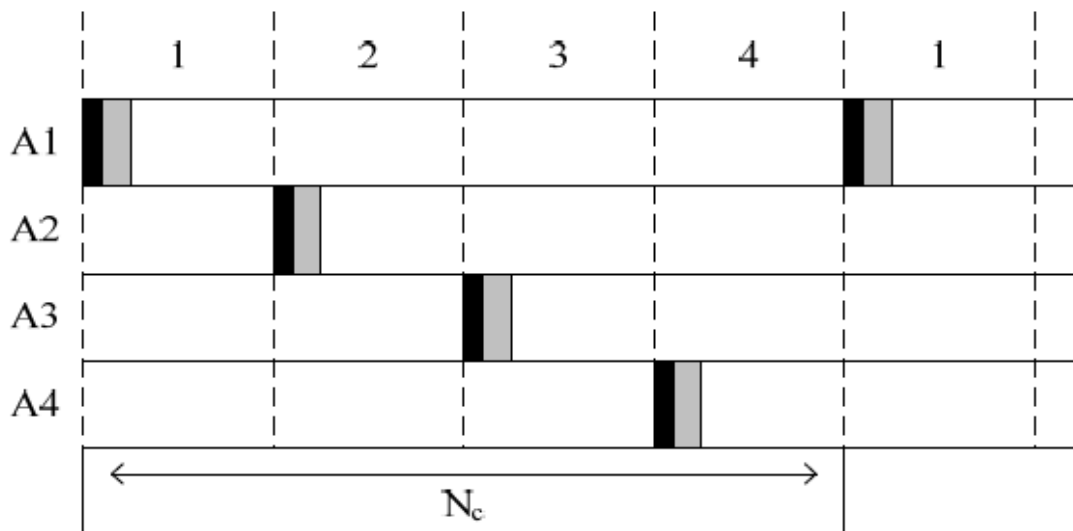
Después de este cálculo, los nodos son enviados en orden de laxitud ( $L$ ), teniendo más prioridad los que menor  $L$  posean.

## 2.4.2. Protocolos MAC de tiempo real blando

- **Basado en S-MAC**

Es el caso de VTS (*Virtual TDMA for Sensors*), que propone un sistema de acceso TDMA con un número de slots igual al número de nodos por celda.

Cada nodo solo puede transmitir una vez en cada supertrama, representada en la Figura 2-14.



**Figura 2-14: Supertrama VTS**

Después de varios ciclos, la duración de la supertrama se reajusta en función del número de nodos que en ese momento pertenezcan a la red.

Los envíos se organizan siempre según la misma secuencia. La franja negra representa el paquete CTL, que se utiliza para labores de control, como mantener la sincronización de los nodos, descubrimiento de nodos o reserva del canal. La franja gris es la ubicación de

los datos que se quieren enviar, y la franja blanca representa el tiempo en que el nodo permanece inactivo.

VTs utiliza menos energía y tiene menos latencia que el protocolo sensor-MAC convencional cuando la red está compuesta por pocos nodos. En el caso contrario, consume más energía y además presenta importantes problemas de retardo si la frecuencia con la que los nodos generan mensajes es elevada.

- **Reutilización espacial de canal**

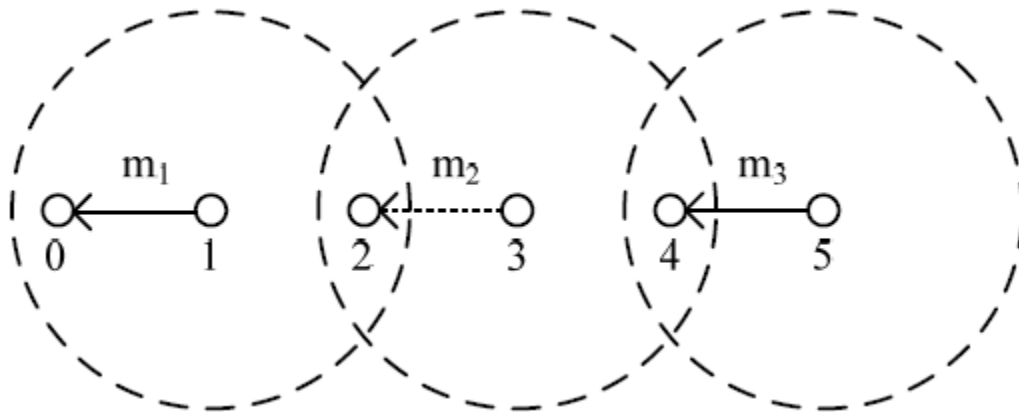
CR-SLF son las siglas de *Channel Reuse-based Smallest Latest-start-time First*. Es un protocolo que presenta un algoritmo pensado para una red compuesta por nodos móviles.

Para conseguir que los mensajes lleguen a tiempo, evitando colisiones y aprovechando mejor el espacio, este algoritmo intenta ejecutar distintas cadenas de mensajes en paralelo, o dicho de otra forma, los nodos que no están implicados en el camino de un mensaje hasta la estación base quedan a disposición del envío de cualquier otro mensaje.

El algoritmo se ejecuta en tres pasos:

- Paso 1: Se selecciona la transmisión a controlar, según la que tenga menor LST (*Latest start time*). Esto significa que se escoge para transmitir aquel mensaje que hace más tiempo que no se propaga, y que será por tanto también el más urgente.
- Paso 2: La transmisión escogida se asigna a un conjunto de los que se ejecutarán en paralelo, intentando antes de crear uno nuevo asignar el mensaje a uno de los que ya están creados.
- Paso 3: Se envía el mensaje y se actualiza el tiempo de finalización del conjunto.

En la siguiente imagen (Figura 2-15) se ilustra el procedimiento con un ejemplo.



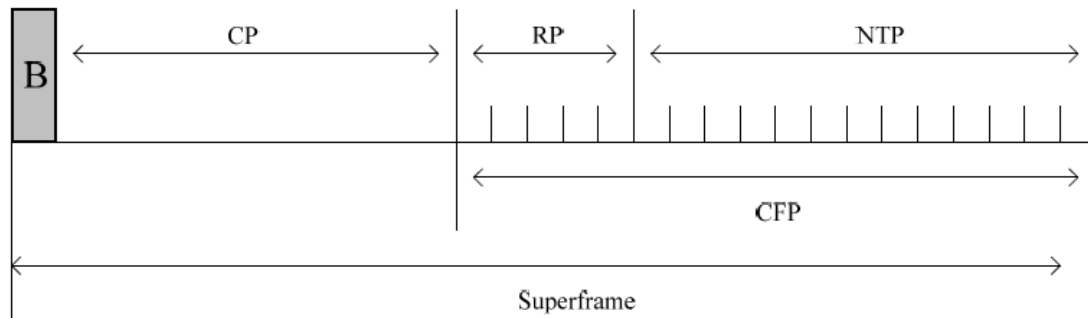
**Figura 2-15: Caso de ejemplo de CR-SLF**

Es este ejemplo,  $m_1$  es el primero en ser seleccionado por tener el menor LST. Después se elige  $m_2$ , pero como su radio de emisión interfiere con el del nodo 1, no se asigna a ningún conjunto. Finalmente se asigna la transmisión  $m_3$ , que sí puede hacerse sin interferir con la  $m_1$ , por lo que la transmisión de los mensajes nacidos en los nodos 1, 3 y 5 se llevarán a cabo en dos pasos:  $S_1 = \{m_1, m_3\}$  y  $S_2 = \{m_2\}$ .

- **Eficiente en energía**

En este apartado se ubica el LPRT (*Low Power Real Time*). Es un híbrido entre TDMA y transmisión en contienda como CSMA/CA, y se utiliza para topologías de estrella, donde cada nodo se puede comunicar con la estación base en un solo salto.

Las supertramas se dividen en un número fijo de mini-slots, y su transmisión comienza en la estación base.



**Figura 2-16: Supertrama LPRT**

Tal y como muestra la Figura 2-16, la supertrama LPRT comienza con una trama baliza (B), seguida por un periodo de contienda (CP) administrado según CSMA/CA, y un periodo sin contienda (CFP) dividido en slots de tiempo donde se transmite la información que no está en tiempo real.

Una vez analizados los protocolos, se expone a continuación una tabla resumen con sus características, lo que facilitará su elección en el futuro.

Protocolo	Eficiente en energía	Sincronía	Adaptabilidad
<b>RRMAC</b>	No	Sí	No
<b>Modo Dual</b>	No	Sí	Sí
<b>TOMAC</b>	No	N/A	No
<b>SUPPORT</b>	No	N/A	Sí
<b>VTS</b>	Sí	Sí	No
<b>LPRT</b>	Sí	Sí	No
<b>CR-SLF</b>	No	N/A	Sí

**Tabla 2-2: Características de los protocolos MAC**

## 2.5. Modelos de pérdidas

Los algoritmos de encaminamiento implementados tal y como han sido descritos anteriormente asumen que la transmisión de un mensaje entre dos nodos es viable comprobando simplemente que el destinatario queda dentro del radio de cobertura proporcionado por su antena. Sin embargo, cuando se tienen en cuenta las pérdidas



propias del interfaz aire, se observa que el radio de cobertura bajo el cual se entregan los mensajes con un mínimo de seguridad es inferior al resultado de un simple cálculo de potencias.

Por ello, es recomendable tener en cuenta un modelo de pérdidas a la hora de diseñar los parámetros de transmisión.

En este caso, las pérdidas se han tratado según el modelo de desvanecimiento log-normal, presentado a continuación.

Para este análisis se asume que los nodos de la red disponen de algún sistema que les permita conocer su localización absoluta en el terreno, como un GPS de bajo consumo, o al menos la distancia a la que se encuentra de sus nodos vecinos, calculable a partir de la intensidad con la que les llegue la señal procedente de los mismos.

Las pérdidas no sólo dependerán de la distancia, sino de múltiples factores del entorno que hacen que varias transmisiones entre los dos mismos nodos presenten distintos niveles de potencia de señal y de ruido a su llegada.

Teniendo en cuenta las pérdidas debidas a la distancia, el modelo de dos rayos y el ruido según una distribución gaussiana blanca, el modelo estadístico que representa las pérdidas puede expresarse como:

$$\left[ \frac{P_R(d)}{P_R(d_0)} \right] dB = -10\alpha \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2-25)$$

La potencia recibida media a una distancia  $d$  se calcula en relación a la recibida a una distancia de referencia  $d_0$ , dado que ni el modelo de dos rayos ni el de propagación en espacio libre tienen solución para  $d = 0$ .

Los demás parámetros se ajustan en función del entorno, siendo  $\alpha$  una constante que representa los obstáculos del trayecto (típicamente  $\alpha = 2$ ), y  $X$  una gaussiana de media cero y varianza  $\sigma$  para representar el ruido.

Las pérdidas medias de propagación pueden expresarse:

$$\overline{PL}(d) \propto \left[ \frac{d}{d_0} \right]^\alpha \quad \overline{PL}[dB] = \overline{PL}(d_0) + 10\alpha \log \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2-26)$$

Que tras incluir el modelo de desvanecimiento log-normal:

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d) + X_\sigma = \overline{PL}(d_0) + 10\alpha \log \left[ \frac{d}{d_0} \right] + X_\sigma \quad (2-27)$$

$$P_r(d)[dBm] = P_t[dBm] - PL(d)[dB] \quad (2-28)$$

$$P_r(d)[dBm] = P_t[dBm] - \overline{PL}(d_0) - 10\alpha \log \left[ \frac{d}{d_0} \right] - X_\sigma \quad (2-29)$$

A partir de estas ecuaciones, es posible estimar la probabilidad de que el nivel de potencia recibido a una distancia  $d$  sobrepase un umbral  $\gamma$ , que es el umbral a partir del cual se considera que la señal llega con una intensidad suficiente como para que el paquete sea decodificado correctamente.

$$P_r[P_r(d) > \gamma] = Q\left[\frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sigma}\right] \quad (2-30)$$

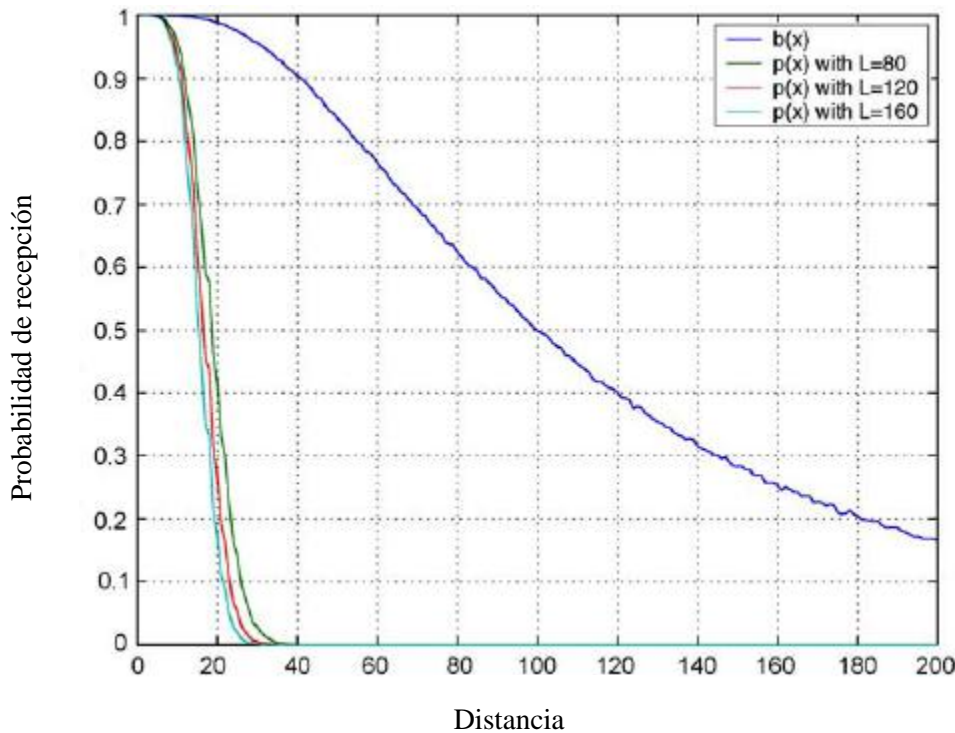
Donde

$$Q[z] = 0.5 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{z}{\sqrt{2}} \right] \right] \quad (2-31)$$

Por lo que se puede escribir como:

$$P_r[P_r(d) > \gamma] = 0.5 \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\gamma - \overline{P_r(d)}}{\sqrt{2}\sigma} \right] \right) \quad (2-32)$$

La probabilidad de recibir un paquete completo sin error se denotará como  $p(x)$ , que depende fuertemente de  $b(x)$ , que es la probabilidad de que un bit llegue correctamente (Según la relación  $p(x) = b(x)^L$ , donde  $L$  es la longitud en bits del paquete, y asumiendo que no se utiliza ninguna técnica de corrección de errores). A partir de estos términos se define también  $R$ , que será, por conveniencia para el estudio, el radio de cobertura bajo el cual se asegura que  $p(x) \geq 0.5$ , valor que evidentemente variará según la longitud del paquete, ya que si éste es más largo, la probabilidad de que alguno de sus bits no llegue correctamente será más alta.



**Figura 2-17:  $b(x)$  y  $p(x)$  para  $L = 80, 120$  y  $160$ , con  $\alpha=2$**

De la simulación mostrada en la Figura 2-17 es posible obtener una aproximación, de forma que se facilite el cálculo de  $p(x)$  en los nodos que lo utilicen para tareas de encaminamiento.

$$\begin{aligned}
 p(x) &= 1 - \frac{\left(\frac{x}{R}\right)^{2\alpha}}{2} \quad \text{para } x < R \\
 p(x) &= \frac{\left(\frac{2R-x}{R}\right)^{2\alpha}}{2} \quad \text{para el resto de } x
 \end{aligned}
 \tag{2-33}$$

La forma en la que este modelo debe aplicarse dependerá de las posibilidades que presente la red en concreto. Si ésta tiene la capacidad de asignar un distinto nivel de potencia transmitida a cada nodo, se puede conseguir una probabilidad de error fija en todos los enlaces, ajustando las potencias para tal fin. En las referencias [36] y [10] se demuestra además que esta variación es una optimización energética.

En el caso de un modelo con potencias de transmisión fija, unas pérdidas de canal se traducen en pérdida de bits, e incluso de paquetes. Cuando un paquete se pierde, éste debe ser retransmitido, incurriendo así en un nuevo gasto de energía.

Existen dos opciones a la hora de retransmitir un mensaje.

Una es la EER (*End to End Retransmissions*), en la que se conoce la pérdida o deterioro del paquete una vez llega (o debería haber llegado) a destino. Es entonces cuando se pide la retransmisión del paquete desde su origen.

La otra es HHR (*Hop to Hop Retransmissions*), donde la retransmisión del paquete perdido o deteriorado se pide desde el nodo intermedio que detecta el fallo.

## 2.6. Análisis de aplicabilidad

Como ha quedado reflejado en este capítulo, el espacio de exploración es muy amplio, considerando el número de configuraciones posibles para una red de nodos inalámbricos.

Por ese motivo se ha optado por elegir una configuración concreta, válida para la generación de un primer entorno de simulación, de la que se podrán obtener conclusiones firmes, extrapolar hipótesis para otro tipo de redes, y definir posibles caminos de actuación para futuros estudios que sigan completando los posibles casos de aplicación de comunicaciones selectivas en redes de sensores inalámbricos.

Se detalla a continuación punto por punto la elección tomada para cada parámetro de configuración.

### Algoritmos de comunicación selectiva

Dado que el objetivo principal del proyecto es la evaluación de estos algoritmos en distintas configuraciones de red, serán analizados los dos para todos los escenarios tenidos en cuenta, y siempre que su uso tenga sentido.

### Topologías de red

El caso general de aplicación será la red en línea, por varios motivos:

- Los dos algoritmos de descarte de mensajes tienen sentido en una red de este tipo, lo que permitirá hacer comparaciones entre el funcionamiento de ambos en distintos escenarios
- Hay otras topologías que podrían considerarse conjuntos de redes en línea a nivel de simulación. Esto significa que se puede generar un algoritmo genérico para redes en línea, aplicable bajo ciertos criterios a otras topologías distintas.

En el próximo capítulo se detallará como se debe generar el subconjunto de redes en línea para cada topología.

### Protocolo de encaminamiento

Para el entorno de simulación escogido, se considera que las motas son fijas, y conocen desde un primer momento, y sin necesidad de intercambiar mensajes periódicamente con sus vecinas, cuál es su nodo más cercano y a qué distancia está. En un caso real esta información podría venir dada por GPS, o por estimas de RSSI de los mensajes recibidos por otros nodos.

En esta situación, y considerando que los nodos sólo tendrán un destinatario posible para sus mensajes, el mejor protocolo de enrutamiento es el *greedy forwarding*, cuyo uso será necesario sólo en las redes más complejas de las que se analizan.

### Protocolo MAC

El uso que se le ha dado a Matlab para estas simulaciones presenta ciertas dificultades para implementar protocolos de comunicación.

En el código generado para este proyecto, no hay un intercambio real de mensajes, sino variables y vectores que cambian su valor para simular un paso de mensajes y su consiguiente consumo energético. Esto implica que no hay interpretación de cabeceras de mensajes, por lo que será necesario simular un protocolo simple y sistemático.

Por este motivo, la elección ha sido el algoritmo VTS, dado que su migración a redes en línea es inmediata. Para redes más complejas, se comentará en el apartado correspondiente las modificaciones que se tuvieron que realizar para adaptar el protocolo.

La limitación de este protocolo es la frecuencia con la que se generan mensajes en la red, por lo que se ajustará de forma inversamente proporcional al número de nodos en la red.

### Modelo de pérdidas

Un canal con pérdidas lleva a dos reacciones en una mota transmisora.

La primera es reajustar la potencia de transmisión para intentar aumentar la SNR de la señal recibida en el receptor. Como en este proyecto las distancias utilizadas son relativas, la potencia de transmisión será considerada igual para todas las motas, por lo que en ese aspecto no resultará útil incluir modelado de pérdidas.

Además, atendiendo a los resultados obtenidos en 2.2.3, se puede demostrar que un despliegue se acerca más al caso óptimo en tanto la separación entre nodos sea equidistante, lo cual, bajo condiciones ideales de canal, implica también una misma potencia de transmisión para todos ellos.

En segundo lugar, las pérdidas o desvanecimientos del canal provocarán errores de bit, que se traducen en retransmisiones de paquetes. Pueden llevarse a cabo simulaciones para asociar la distancia entre nodos con el número de retransmisiones, y por lo tanto, con la energía requerida para hacer llegar un mensaje a la estación base.

# Capítulo 3

## Caracterización de los sensores inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos han sido ampliamente validadas para multitud de aplicaciones y casos prácticos, por lo que no es de extrañar que se encuentren numerosos proveedores de estos dispositivos [2], [3], [4], [5].

Todos ellos presentan sin embargo una metodología de funcionamiento muy similar, y una arquitectura compuesta por los mismos subsistemas básicos, con la diferencia de los periféricos o los sensores especializados en distintos tipos de medida.

En este capítulo se resumen los estados de funcionamiento de las motas, los subsistemas hardware que las componen, y los consumos asociados en función del estado en que se encuentren.

Con esta información será posible posteriormente definir adecuadamente los parámetros que conformarán el entorno de las simulaciones que se llevaron a cabo durante el proyecto, obteniendo así resultados acordes a los esperados de un despliegue real.

## 3.1. Estados de funcionamiento

Con el fin de modelar el consumo de batería de los nodos a lo largo del tiempo, se han preestablecido varios estados de funcionamiento en función de la tarea que estén llevando a cabo en ese momento.

### 3.1.1. Tx

Corresponde al estado en que el circuito transmisor está activo. De aquí en adelante, sean o no equidistantes los nodos de la red se considerará que la energía consumida durante este estado es la misma para todos ellos.

### 3.1.2. Rx

Estado de recepción. En este caso la radio permanece activa esperando la llegada de un mensaje. El consumo asociado será mayor que el de transmisión, dado que siempre se selecciona la ganancia de antena capaz de cubrir el peor de los casos, es decir, la recepción de un mensaje desde un nodo al límite del área de cobertura.

### 3.1.3. Idle

Estado inactivo. En este estado lo único que permanece en ejecución son las actividades básicas del procesador, incluyendo los accesos a memoria que necesite hacer. El consumo de este estado es muy inferior al de cualquiera de los otros, ya que en ellos se registra este consumo añadido al de la funcionalidad propia del estado.

Dentro de este estado debe mencionarse una opción de la que disponen algunos sensores, que es el *Deep Sleep*, o sueño profundo. En este modo la cantidad de energía consumida es ínfima, debido a que se anulan también prácticamente todas las actividades del procesador, quedando el nodo en un estado de hibernación a la espera de ser despertado.

### 3.1.4. Sense

Estado en el que el sensor recibe energía para tomar una medida y generar un mensaje con esa información. Su consumo suele ser inferior al del uso de la radio.

## 3.2. Elementos básicos de las motas

En este apartado se exponen brevemente las características de los elementos básicos de funcionamiento que componen las motas, lo que permitirá entender en qué medida el uso de cada componente afecta al consumo de batería.

Posteriormente, una vez estudiados los distintos subsistemas que ejercen como fuentes de consumo, y los estados de funcionamiento de las motas, se tabularán los consumos de cada subsistema en función del estado.

### 3.2.1. Procesador

En el mercado actual hay disponibles varios tipos de dispositivos integrados válidos para realizar las funciones de un procesador.

- **FPGA (*Field Programmable Gate Array*):** Son las menos utilizadas, dado que presentan un consumo más elevado en comparación con sus alternativas.
- **Microprocesadores:** Debido a la necesidad de utilizarlos junto a otros dispositivos externos, como unidades de almacenamiento o conversores, se suele optar por el uso de microcontroladores.
- **Microcontroladores:** Incluyen en un mismo chip un microprocesador y memoria, además de interfaces para ADC/DAC, UART, SPI, temporizadores y contadores. Son los más utilizados.

La labor de procesamiento de datos y coordinación de dispositivos es vital para el funcionamiento de las motas, por lo que es una actividad que ocurrirá siempre que se requiera alguna funcionalidad. La conclusión que se deriva de ello es que el consumo producido por el procesador es algo inevitable, y la única forma de optimizarlo será la desconexión temporal de todas las funcionalidades de la mota, o la activación selectiva de solo algunas de ellas.

Conseguir un modo de inactividad que, por un lado, mantenga predispuesta a la mota para realizar cualquier acción de forma casi instantánea, y por otro, consuma la menor cantidad de energía posible, es uno de los retos para todos los fabricantes de sensores inalámbrico. En los datasheet se encuentran valores de entre 20 y 400  $\mu\text{A}$ , por lo que la corriente consumida que se tendrá en cuenta para las simulaciones será el promedio mostrado en la Tabla 3-1.

Modo	Corriente consumida
Activo	8.0 mA
Idle	200 $\mu\text{A}$

**Tabla 3-1: Consumo de corriente de MCU**

### 3.2.2. Memoria

Desde el punto de vista del consumo de energía, los tipos de memoria más utilizados son la integrada en el chip del microcontrolador, la memoria flash y la memoria RAM.

La memoria flash es una evolución de la memoria EEPROM, que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una sola operación del procesador. Por ello, aporta velocidades de acceso muy altas. Además, es de tipo no volátil, lo que implica que su contenido no se pierde una vez se retira su fuente de alimentación.

El tipo de memoria más común es la RAM. Por ejemplo, en las motas Imote2 se dispone de 32 MB de RAM [4].

Según el estado, el tipo de acceso a memoria será diferente. En la Tabla 3-2 aparece una relación de tiempos de acceso y corriente empleada para cada estado.

Estado	Operación	Corriente	Tiempo de acceso
<b>Idle</b>	N/A	N/A	N/A
<b>Sense</b>	Escritura	18 mA	100 ns
<b>TX</b>	Lectura	6 mA	100 ns
<b>RX</b>	Escritura	18 mA	100 ns

**Tabla 3-2: Consumo de corriente y tiempo empleado para los accesos a memoria**

### 3.2.3. Sensor

El consumo de energía ejercido por el sensor estará fuertemente influenciado por su tipo:

- Sensor pasivo: No necesitan manipular el entorno. Son capaces de realizar la medida con la energía que desprende el objetivo, siendo su consumo el derivado de amplificar la señal recibida para poder luego traducirla a un impulso eléctrico, o al cambio en alguna otra característica electrónica, como capacidad o resistencia. Un fotorreceptor es un ejemplo de sensores de este tipo, ya que transforma la energía de los fotones que le llegan en corriente eléctrica.
- Sensor activo. Necesita aportar energía de algún tipo a su entorno para poder realizar la medida. Su consumo es significativamente mayor al de los sensores pasivos. Un sistema de detección por radar o ultrasonido utilizará este tipo de sensores.

Para evaluar el consumo producido por los sensores, se tomará como referencia los dispositivos montados en la placa de sensores ITS400 de las motas Imote2, que son:

- Un acelerómetro de tres ejes: ST Micro LISL02DQ
- Un sensor de humedad: Sensirion SHT15
- Un termómetro digital: TI TMP175
- Un medidor de luz: TAOS TSL2651

Prestando atención a sus hojas de catálogo, la corriente consumida como máximo cuando todos ellos estén funcionando es de alrededor de:

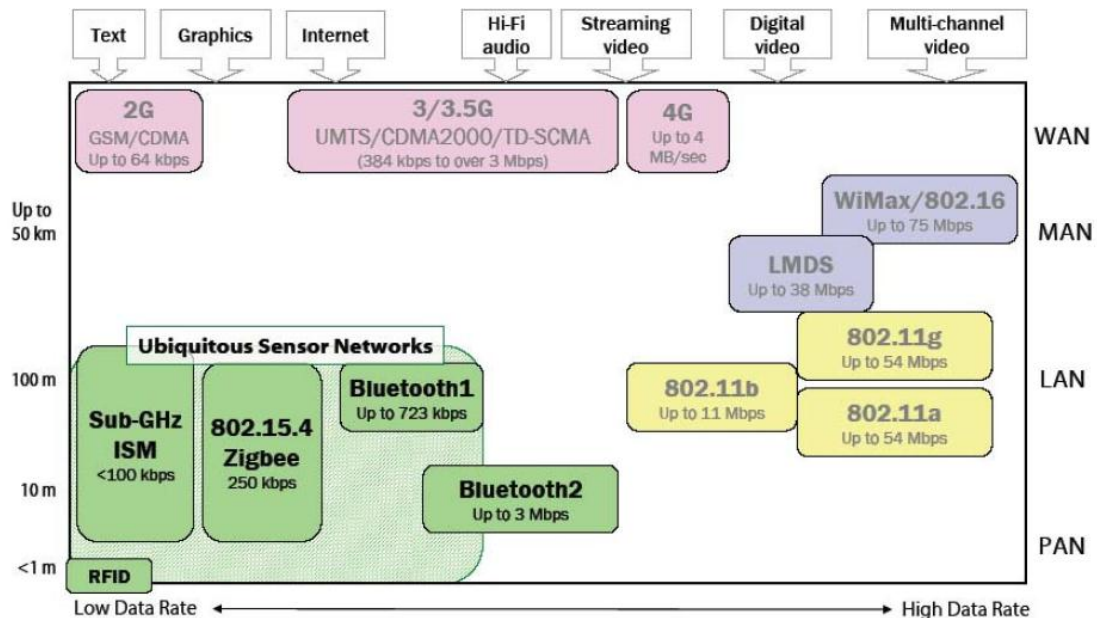
$$I_{Sense} = 4 \text{ mA}$$

### 3.2.4. Subsistema de Comunicación inalámbrica

Hay varios medios de transmisión inalámbrica que una mota puede utilizar para comunicarse con el resto de la red, como rayos infrarrojos, láser o radiofrecuencia (RF), aunque es ésta última la más utilizada debido a su versatilidad.



Uno de los problemas principales del uso de radiofrecuencia es que la energía necesaria aumenta con la frecuencia. Sin embargo, la distancia (el otro factor limitante) relativamente corta entre nodos permite el uso de frecuencias lo suficientemente altas como para tener un ancho de banda muy aceptable, obteniendo de esta forma un buen compromiso entre consumo de energía, distancia alcanzada y tasa de datos.



**Figura 3-1: Tasa de datos VS alcance de los distintos estándares de comunicaciones**

Como se ilustra en la Figura 3-1, Bluetooth y ZigBee son las tecnologías mejor encuadradas en el compromiso mencionado anteriormente, siendo la última la más utilizada en redes de sensores inalámbricos. Esta elección se debe a las ventajas que ZigBee presenta frente a Bluetooth, críticas para el despliegue de una WSN, como el mayor número de elementos máximo en una subred (65535 frente a 8), y el menor consumo de energía, sobretodo en reposo, ya que ZigBee dispone de un estado de inactividad que Bluetooth no permite.

### 3.2.4.1. Estándar de comunicación: ZigBee

ZigBee es una especificación de un conjunto de protocolos de comunicación de alto nivel para radios digitales de baja potencia, basado en el estándar IEEE 802.15.4 [37]. Como Bluetooth, está enfocado a WPANs (*Wireless Personal Area Networks*), donde se requiere una comunicación por radiofrecuencia segura, larga duración de la batería y unas tasas de datos que no son especialmente altas.

El bajo coste de esta tecnología permite que haya sido desplegada en gran cantidad de aplicaciones de control y monitorización inalámbrica.

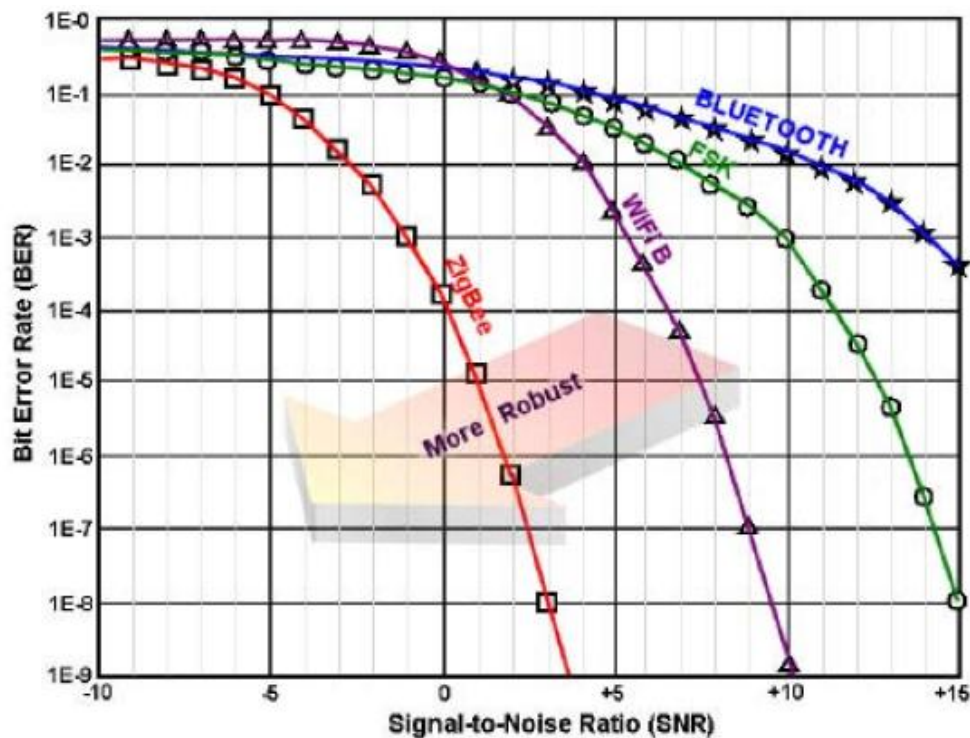
Opera en las bandas ISM, que se pueden utilizar sin licencia, y generalmente a 2.4 GHz, dado que es una frecuencia ISM a nivel mundial. Estas frecuencias permiten unas tasas de datos de 20 a 250 kbps.

El potencial de ZigBee respecto al ahorro de energía viene dado en gran medida por el pequeño tiempo que los nodos requieren para pasar de modo inactivo a activo (30 ms), mucho menor que el que necesita Bluetooth, que llega a los 3 segundos. Esto hace que los

nodos puedan permanecer inactivos siempre que no se requiera su actuación, ya que el tiempo que les lleva despertar no provoca graves problemas de latencia.

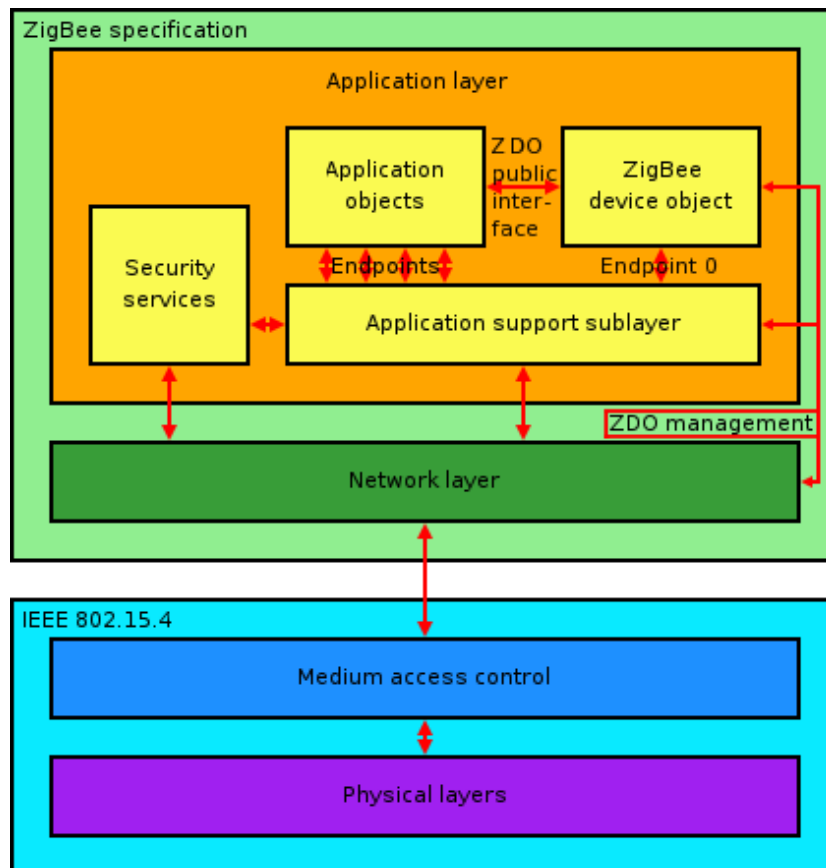
Esta capacidad facilita que el funcionamiento de las motas se esquematice como una máquina de estados, ya que se puede pasar de un estado a otro con relativa facilidad. Los estados más comunes de funcionamiento están descritos en el apartado 3.1 de este documento.

Otra razón para escoger ZigBee es que dada la escasez de recursos energéticos en las redes de sensores, se prima la robustez frente a la tasa de datos, ya que el reenvío de mensajes supone una penalización grave en el consumo de energía. En la Figura 3-2 se observa cómo ZigBee es la tecnología más robusta de todas las disponibles para redes de sensores inalámbricos.



**Figura 3-2: Robustez de protocolos para WSN**

ZigBee define la capa de red (Nivel 3) y de aplicación (Nivel 4) que va sobre las capas física y MAC que especifica el estándar IEEE 802.15.4, tal y como se muestra en la Figura 3-3. Esta capa de red permite todas las topologías mencionadas en el capítulo 2.1, siempre que exista un nodo coordinador capaz de controlar los parámetros de la red y permitir su mantenimiento.



**Figura 3-3: Pila de protocolos ZigBee**

El estándar IEEE 802.15.4 define los dos primeros niveles de la torre de protocolos que se utilizan en ZigBee:

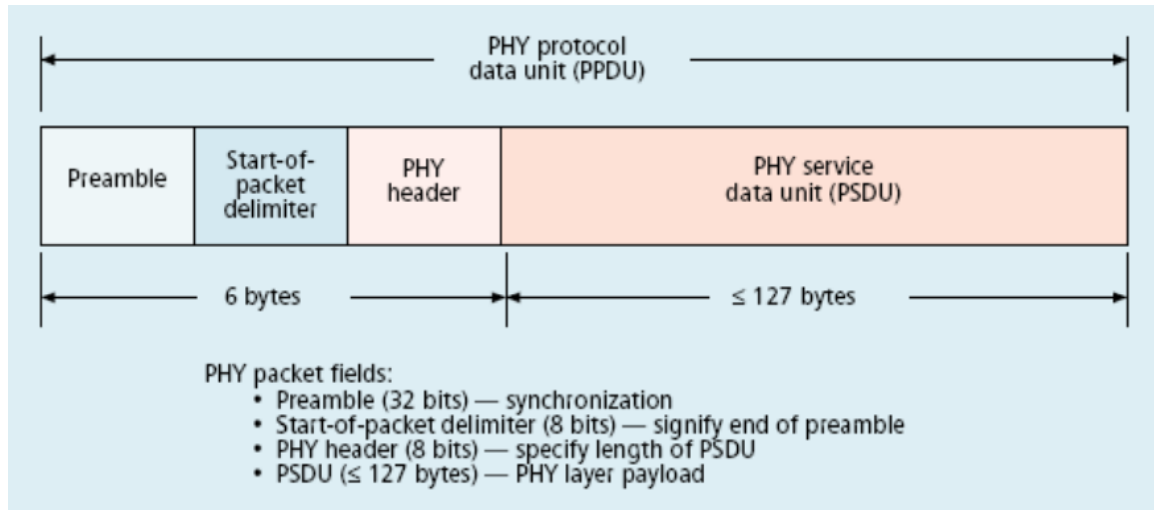
#### Capa PHY (Nivel físico)

Provee el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico, es decir, genera las formas de onda que se transmitirán a partir de las cadenas de bits que recibe de los niveles superiores. Además, selecciona los canales que se utilizan en el enlace y controla el nivel de potencia de la señal. También proporciona acceso a los servicios de gestión del nivel.

Puede trabajar en una de las siguientes frecuencias no reguladas (ISM):

- Europa: 868 – 868'8 MHz, donde permite 3 canales de comunicación.
- Norte América: 902 – 928 MHz, que permite hasta 30 canales.
- Nivel mundial: 2400 – 2483'5 MHz, con hasta 16 canales.

La PPDU de para ZigBee tiene el formato que aparece en la Figura 3-4:



**Figura 3-4: Formato de la PPDU de ZigBee**

Esto quiere decir que, con una tasa de datos de 250 kbps, una trama que transmita muchos datos de payload (unos 120 bytes) tendría una duración de unos 4 ms.

#### Capa MAC (Nivel de acceso al medio)

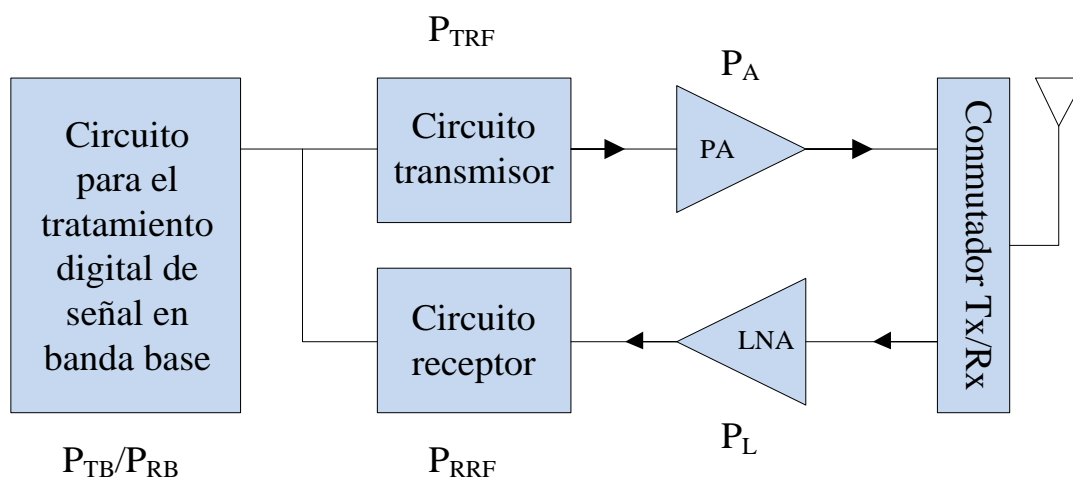
Controla la validación de las tramas y asociaciones entre nodos, y garantiza los slots de tiempo para cada uno de ellos. También ofrece una interfaz de control y regula el acceso al canal físico.

#### **3.2.4.2. Modelo de consumo**

En este apartado se ilustra la forma en que el subsistema de comunicación inalámbrico de las motas consume la batería de la que disponen.

Para llevar a cabo este estudio, se asume el empleo de técnicas que eviten tanto la colisión de mensajes como la interferencia entre nodos, así como una tasa binaria de transmisión constante para todos los mensajes intercambiados.

El análisis comenzará con el estudio del consumo de cada elemento que compone la arquitectura hardware del subsistema de comunicaciones (Figura 3-5).



**Figura 3-5: Subsistema de comunicación inalámbrica**

PA: Amplificador de potencia (*Power Amplifier*)

LNA: Amplificador de bajo ruido (*Low Noise Amplifier*)

$P_{TB}/P_{RB}$ : Potencia consumida en el circuito banda-base para el tratamiento digital de señal en transmisión o recepción.

$P_{TRF}/P_{RRF}$ : Potencia consumida por el frontal de RF, utilizado para transmitir y recibir.

$P_A$ : Potencia consumida por el amplificador de potencia (para transmisión).

$P_L$ : Potencia consumida por el amplificador de bajo ruido (para recepción).

Según esta nomenclatura, la potencia total consumida en transmisión y recepción puede modelarse según las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} P_T(d) &= P_{TB} + P_{TRF} + P_A(d) = P_{T0} + P_A(d) \\ P_R &= P_{RB} + P_{RRF} + P_L = P_{R0} \end{aligned} \quad (3-1)$$

De ellas puede obtenerse el primer resultado, y es que la potencia necesitada en recepción no depende de la distancia a la que se encuentran los nodos, pues el amplificador (LNA) debe estar preparado para el peor de los casos, que será la recepción desde un nodo que se encuentre en el límite del área de cobertura. En transmisión sin embargo la potencia depende de la distancia, pues el PA es regulable y permite utilizar solo la potencia requerida en cada caso, con el fin de optimizar su uso.

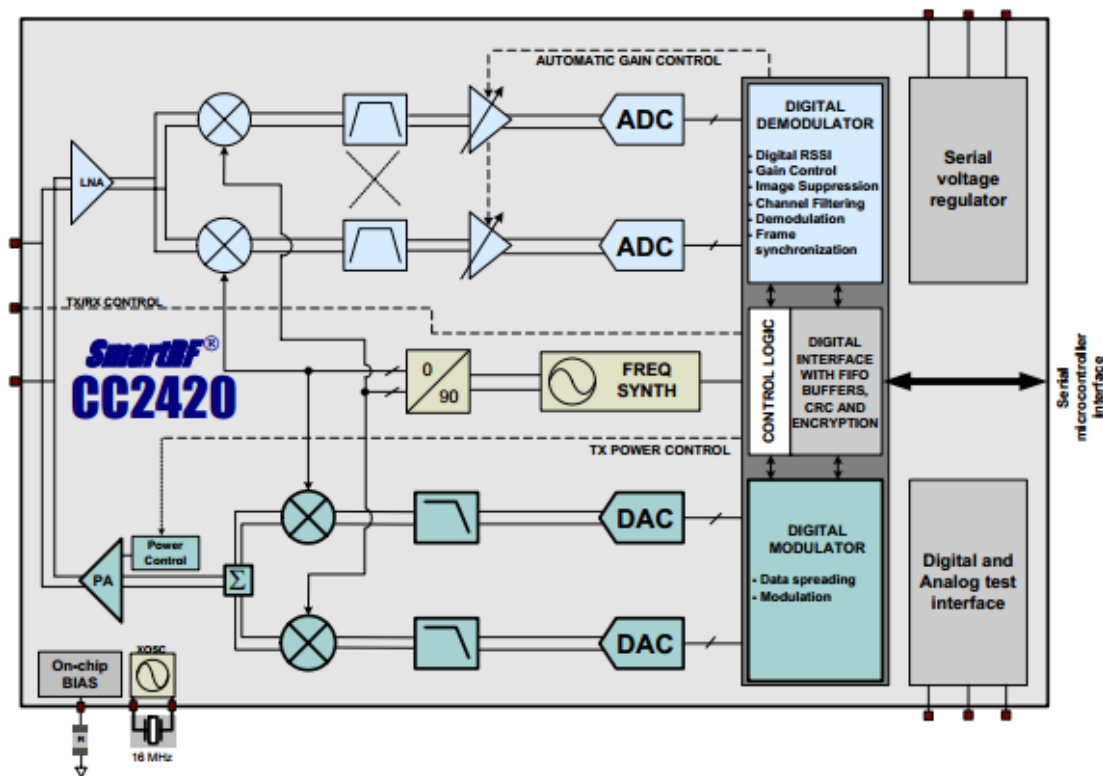
El amplificador de potencia (PA) entrega la potencia necesaria a la antena para la emisión por radio frecuencia ( $P_T$ ). Sin embargo, su consumo real siempre es mayor dado que la eficiencia de los amplificadores es menor al 100 %. Se define la eficiencia de un amplificador como el cociente entre la potencia que entrega a la carga ( $P_T$ ) y la que realmente consume ( $P_{DC}$  ó  $P_A$ ).

$$\eta = \frac{P_T}{P_{DC}} \quad (3-2)$$

Hay que destacar que no es una ecuación lineal, ya que la eficiencia mejora cuanto mayor es la potencia transmitida.

Por lo general, la relación entre la potencia transmitida y la potencia consumida (eficiencia) viene tabulada para varios valores en las hojas de catálogo de los chips Zigbee comerciales, con el formato  $P_{TX}[\text{dBm}] \Leftrightarrow I[\text{mA}]$ .

Como en el caso del estudio de los sensores en 3.2.3, se tomará como base la placa de comunicaciones inalámbricas de los Imote2, la IPR2410, basada en el chip de Texas Instruments CC2420, cuya arquitectura puede apreciarse en la Figura 3-6.



**Figura 3-6: Diagrama de arquitectura de alto nivel de la cadena TX y RX del CC2420.**

Los valores de corriente que aparecen en la especificación de este chip son los siguientes:

Modo	Corriente consumida
Recepción	$I_{RX} = 18.8 \text{ mA}$
Transmisión (0 dBm)	$I_{TX} = 17.4 \text{ mA}$

**Tabla 3-3: Corriente consumida por recibir y transmitir**

Los datos de consumo de los demás productos comerciales tenidos en cuenta son similares a los mostrados en la Tabla 3-3, por lo que se utilizarán valores de en este rango a la hora de parametrizar las simulaciones.

### 3.2.5. Otros periféricos

Además de las mencionadas hasta ahora, algunas motas disponen de elementos opcionales con consumos de energía que deben tenerse en cuenta.

Éste es el caso de LEDs, displays o cámaras. Consumen una cantidad de energía no despreciable frente a las otras fuentes de consumo, pero no se profundizará en ello dado que los LEDs y displays no serán imprescindibles para el funcionamiento (dada la localización remota de los nodos), y la cámara puede ser modelada como un incremento de consumo en el estado en el que el sensor está tomando datos.

# Capítulo 4

## Análisis e implementación

Tal y como se ha adelantado en la introducción, este proyecto está enfocado a la optimización del consumo de energía derivado del uso del subsistema de comunicaciones de las motas que componen una red de sensores inalámbricos.

Existen dos formas de abordar dicha optimización. En el caso de poder desplegar libremente las motas por el terreno, es posible calcular el número de nodos y la distancia entre ellos que hacen que el consumo sea lo más eficiente posible. Sin embargo, cuando la red está ya desplegada o las condiciones de trabajo obligan a seguir una topología concreta, el mecanismo de optimización consiste en aplicar algún criterio a los mensajes que permita descartar aquéllos que no aporten información importante, y así evitar el encendido de la radio.

En este capítulo se profundiza en el funcionamiento de las estrategias de comunicación selectiva identificadas en la bibliografía, y se estudia su futuro comportamiento en entornos más realistas.

## 4.1. Descripción del entorno de simulación

En los capítulos previos se ha expuesto los fundamentos de las tecnologías y algoritmos en los que se basa el trabajo de este proyecto.

Por un lado, en el capítulo 2 aparecen las bases teóricas de las estrategias de descarte de mensajes, donde se habla del umbral de transmisión, que será el parámetro que marque la decisión de transmitir o no un mensaje en función de su importancia.

Por otro lado, en el capítulo 3 se caracterizan las motas, que son los elementos que componen las redes a estudiar. Sobre este estudio se tomarán los valores que requieren las ecuaciones que componen las estrategias de comunicación selectiva, que son fundamentalmente los consumos requeridos para cada estado de funcionamiento de las motas.

Para simular la red de sensores contemplada en cada caso, cada mota se representa con un valor numérico ( $E_K$ ) que guarda la información de la carga restante de la batería. Este valor se irá decrementando en función del estado en que se encuentre la mota, hasta que sea inferior a la energía requerida para transmitir un mensaje  $E_T$  más la de recibirlo  $E_R$ .

Las unidades a utilizar, para poder realizar una aproximación a los valores reales, serán los mAh, que es la unidad con la que se especifica la carga máxima de las baterías convencionales. En el caso de los Imote2, su placa de alimentación está preparada para alojar tres pilas AAA, por lo que se podrían alcanzar unos 3000 mAh de carga máxima total, en base a los valores típicos de las pilas convencionales.

Para calcular la energía restada en cada estado, se presenta a continuación un estudio basado en la información que aparece en el capítulo de caracterización de las motas. Para el cálculo de cada valor, es necesario disponer de la corriente requerida y del tiempo que se permanece ejecutando la acción asociada.

En el cálculo de tiempos intervienen varios factores:

- Uno es la longitud de PPDU. Considerando una tasa de 250 kbps, y una longitud de 120 bytes, el tiempo empleado para transmitir (y recibir) una trama es de unos 4 ms.
- El otro es el protocolo MAC elegido, el VTS. Según este protocolo, cada nodo tendrá un slot de tiempo reservado para transmitir sus mensajes. Se sobreentiende que durante ese tiempo el nodo encargado de recibir esa información permanecerá en estado RX. Como es un reparto TDMA, se ha asignado un tiempo de guarda de 1 ms.

Con estos valores se concluye un tiempo para cada estado de 5 ms. Estos tiempos son orientativos, puesto que el objetivo de este trabajo no es minimizar la latencia de la red ni la energía asociada al protocolo elegido. De hecho, un escenario subóptimo puede resultar útil para poner en evidencia los resultados de un algoritmo concreto, como es el caso de la comunicación selectiva.

### Idle

Éste es el estado destinado al ahorro de energía durante los periodos de inactividad, por lo que el valor de descarga asociado será el más pequeño.



Según los valores de la Tabla 3-1, el procesador consume en este estado 200  $\mu A$ . Si permanece en él durante 5 ms, el valor aproximado será:

$$E_I = \frac{200\mu A \cdot 5ms}{3600 s/h} = 0.27 \cdot 10^{-6}mAh \quad (4-1)$$

### Sense

Aunque este estado se prolongue durante 5 ms como todos los demás, se ha considerado que 300  $\mu s$  es un tiempo razonable en el que la mota puede realizar la medida y almacenarla en memoria a la espera de ser enviada. El consumo entonces vendrá definido por las siguientes ecuaciones:

$$E_{S_A} = \frac{(I_{sense} + I_{MCU_{active}}) \cdot 300\mu s + I_{write} \cdot 100ns}{3600 s/h} = 10^{-6}$$

$$E_{S_I} = \frac{I_{MCU_{idle}} \cdot 4.3ms}{3600 s/h} = 0.24 \cdot 10^{-6} \quad (4-2)$$

$$E_S = E_{S_A} + E_{S_I} = 1.24 \cdot 10^{-6}mAh$$

Es importante destacar que este es el valor estimado para el consumo de los sensores, pero que puede distar sensiblemente del valor de algunas implementaciones, ya sea en consumo de corriente por el uso de dispositivos como cámaras fotográficas con iluminación, o en tiempo de captura de datos.

### TX

Una mota entrará en este estado siempre que le toque el turno según el sistema TDMA del protocolo MAC escogido, y además tenga un mensaje para transmitir.

Tal y como se ha comentado, tardará 4 ms en transmitir el mensaje, y le quedará 1 ms en reposo durante este estado que hará las veces de tiempo de guarda en la comunicación.

Además se requerirá un acceso de lectura a la memoria del dispositivo.

$$E_{TX_A} = \frac{(I_{TX} + I_{MCU_{active}}) \cdot 4ms + I_{read} \cdot 100ns}{3600 s/h} = 28.22 \cdot 10^{-6}$$

$$E_{TX_I} = \frac{I_{MCU_{idle}} \cdot 1ms}{3600 s/h} = 0.055 \cdot 10^{-6} \quad (4-3)$$

$$E_{TX} = E_{TX_A} + E_{TX_I} = 28.28 \cdot 10^{-6}mAh$$

**RX**

Cuando a una mota le toca el turno de recibir, puede ocurrir que haya un mensaje transmitiéndose para ella o que no lo haya. En el primer caso, permanecerá con la radio activa en modo transmisión durante los 4 ms que dura el mensaje. Si no hay ningún mensaje, sólo permanecerá activa durante los 0.4 primeros milisegundos, tiempo suficiente para detectar la cabecera de un mensaje.

Se declaran a continuación los dos posibles consumos energéticos de un estado de recepción.

$$E_{RX_{A\_msg}} = \frac{(I_{RX} + I_{MCU_{active}}) \cdot 4ms + I_{write} \cdot 100ns}{3600 \text{ s/h}} = 29.78 \cdot 10^{-6}$$
$$E_{RX_{I\_msg}} = \frac{I_{MCU_{idle}} \cdot 1ms}{3600 \text{ s/h}} = 0.055 \cdot 10^{-6} \quad (4-4)$$

$$E_{RX\_msg} = E_{RX_{A\_msg}} + E_{RX_{I\_msg}} = 29.83 \cdot 10^{-6}mAh$$

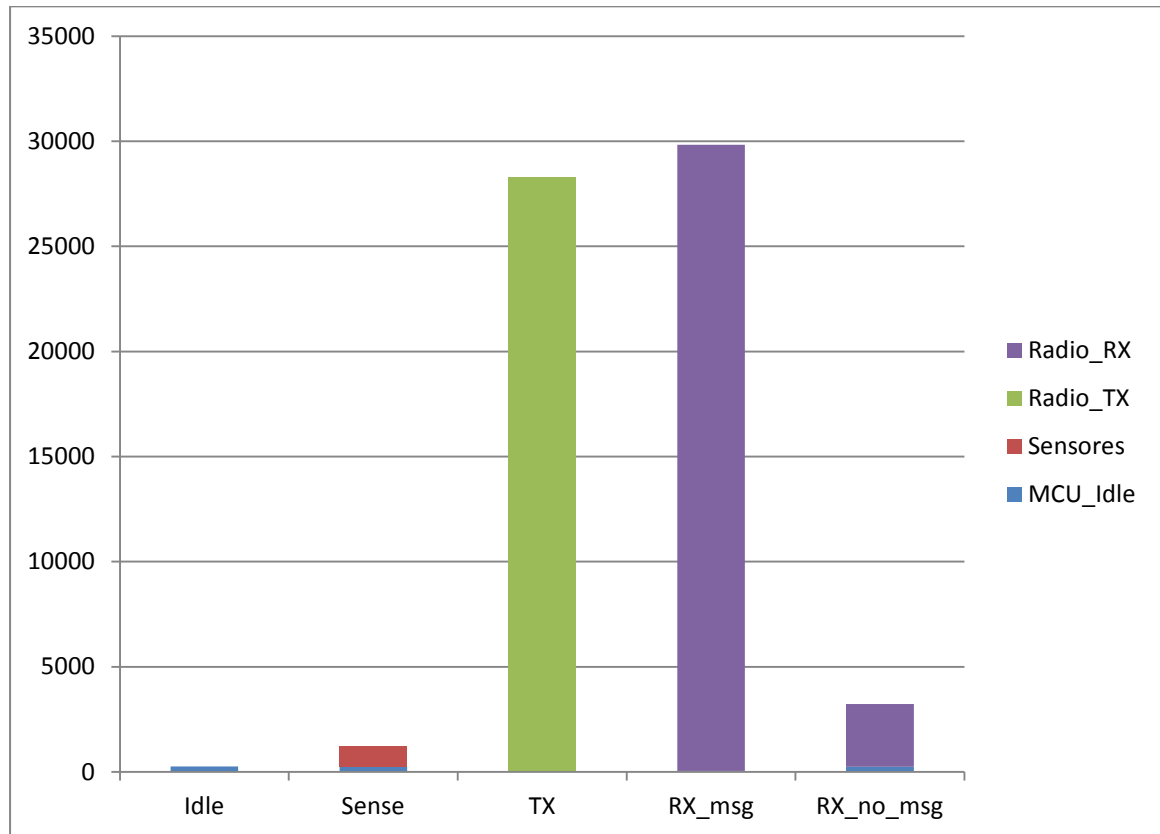
$$E_{RX_{A\_no\_msg}} = \frac{(I_{RX} + I_{MCU_{active}}) \cdot 0.4ms}{3600 \text{ s/h}} = 2.98 \cdot 10^{-6}$$
$$E_{RX_{I\_no\_msg}} = \frac{I_{MCU_{idle}} \cdot 4.6ms}{3600 \text{ s/h}} = 0.25 \cdot 10^{-6} \quad (4-5)$$

$$E_{RX\_no\_msg} = E_{RX_{A\_no\_msg}} + E_{RX_{I\_no\_msg}} = 3.23 \cdot 10^{-6}mAh$$

La transmisión de un mensaje implica varios cambios en el subsistema radio entre transmisión y recepción, debido al intercambio de asentimientos entre ambas partes de la comunicación, según el protocolo MAC que se utilice.

Por simplicidad, de aquí en adelante se considerará que la energía asociada a TX y a RX proporcionada hasta ahora es un cómputo global del coste de batería incurrido por ese intercambio de mensajes.

Para ilustrar el impacto energético de cada uno de los estados se proporciona un gráfico sinóptico que refleja los datos obtenidos en las ecuaciones anteriores (Figura 4-1).



**Figura 4-1: Consumo energético de la mota en función del estado**

## 4.2. Proceso de ejecución

Durante la ejecución, la batería restante de las motas es actualizada iterativamente cada vez que cambia de estado hasta que alguno de los nodos involucrados se quede sin la carga suficiente para efectuar una transmisión, lo que provocaría un fallo en el sistema de comunicación de todas las motas cuyos mensajes esté encargado de retransmitir hacia la base.

Se describe en este apartado la implementación del paso de mensajería y la gestión de estados de cada nodo.

### 4.2.1. Representación de los mensajes

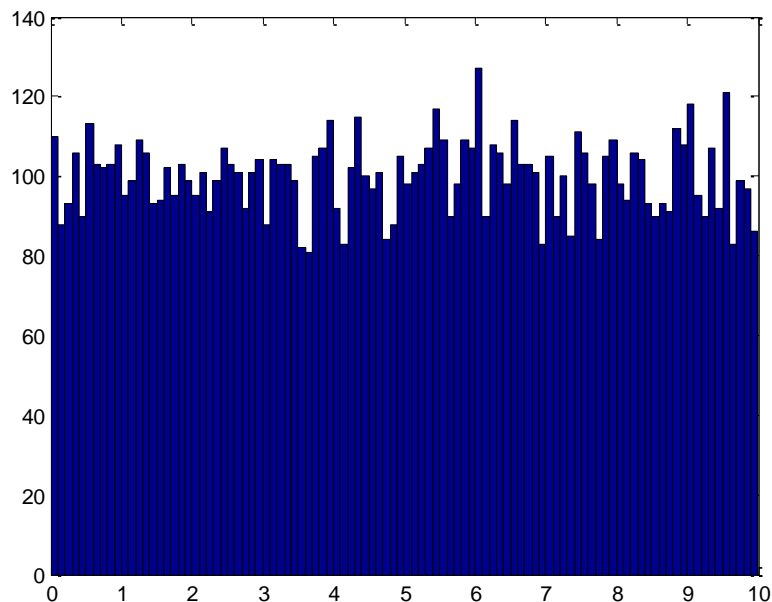
Los mensajes son representados por su importancia ( $x_k$ ). Para simular cómo surgen y son transmitidos estos mensajes, se realiza el siguiente procedimiento.

Al comienzo de una simulación se genera un vector  $x$  de valores aleatorios entre 0 y 10 para cada nodo de la red, con un tamaño previsiblemente mayor que el número de medidas que será capaz de realizar un nodo antes de agotar su batería. Para los conjuntos de simulaciones promediadas se utilizan los mismos vectores de importancias, y así tener una referencia común.

Este vector de números aleatorios se generará según varias distribuciones para después estudiar el efecto producido en la red.

### Distribución uniforme

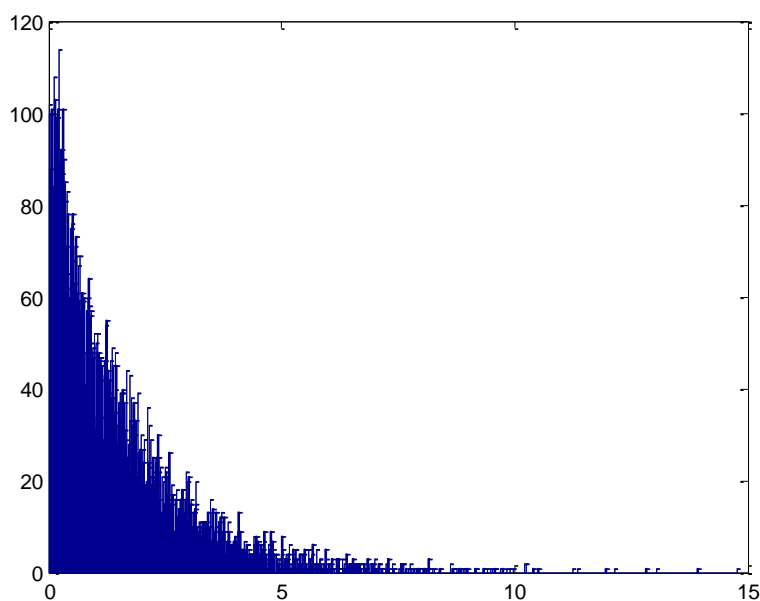
Utilizando esta función se medirán aproximadamente la misma cantidad de mensajes con cada importancia, por lo que será igual de probable recibir mensajes de importancia baja que alta.



**Figura 4-2: Datos procedentes de una distribución uniforme de 1000 puntos**

### Distribución exponencial

La distribución exponencial concentrará la mayor parte de los mensajes en el conjunto de baja importancia. Los datos responderán a una función exponencial con factor de localización  $\mu=5$ .



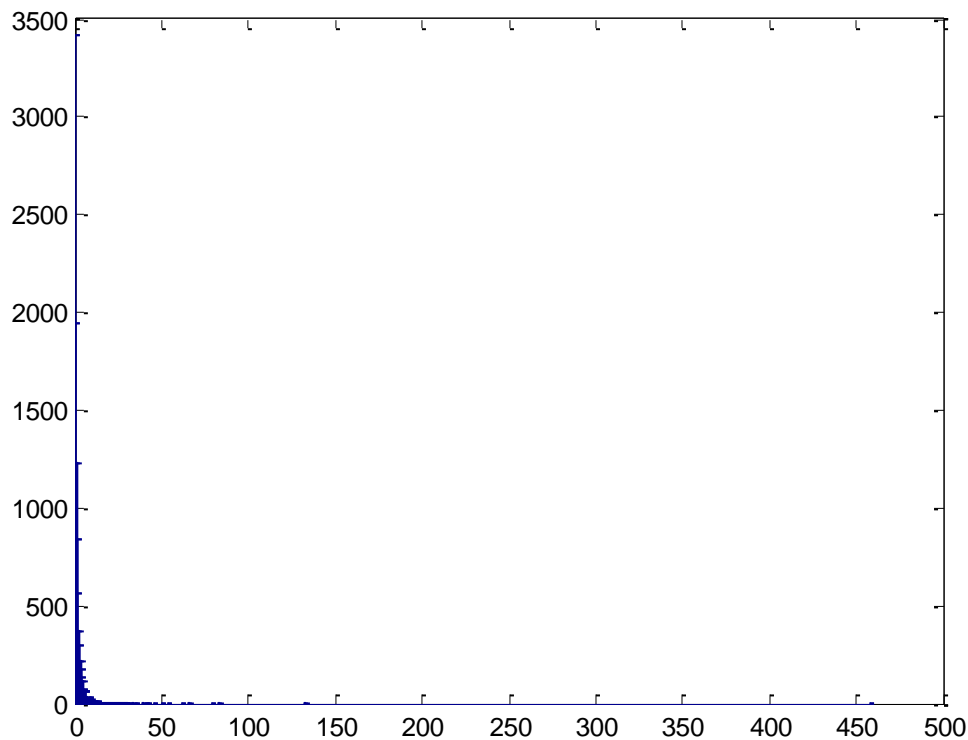
**Figura 4-3: Datos procedentes de una distribución exponencial de 10000 puntos**

---

Hay que destacar que en este caso se tomarán ocasionalmente datos con importancia ligeramente por encima de 10, que es el umbral máximo que se utiliza.

### Distribución de Pareto

Se generarán datos siguiendo una distribución de Pareto con parámetros  $k=3/7$ ,  $\sigma=1$  y  $\theta=0$ .



**Figura 4-4: Datos procedentes de una distribución de Pareto de 10000 puntos**

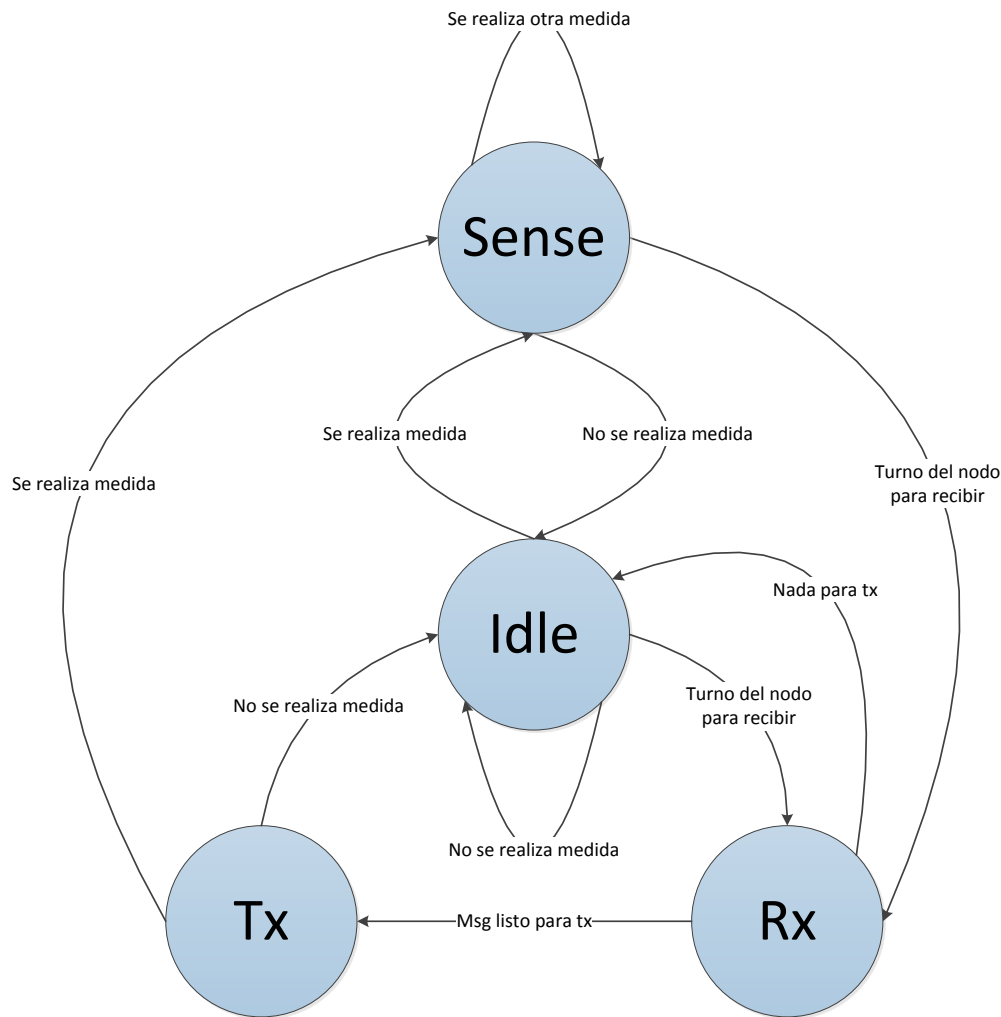
Esta distribución permitirá analizar posibles inconvenientes en redes saturadas de mensajes con muy poca importancia en las que, aunque muy rara vez, aparecen mensajes de importancia extremadamente alta.

Cada vez que una mota realice una medida, tomará un valor, en orden, de su vector  $x$  y lo almacenará en su vector *buffer* siguiendo una filosofía FIFO (*First In First Out*). En este vector almacenarán también los mensajes recibidos, y tomará de él los mensajes que tendrá que retransmitir hacia el siguiente nodo.

### **4.2.2. Máquina de estados**

Para los cambios de estado de las motas se ha implementado una máquina de estados que se adaptará al número de nodos en la línea de transmisión. Cada vez que un nodo entre en un nuevo estado, su  $E_K$  se decrementa la cantidad correspondiente a la acción realizada, según los valores calculados en 4.1.

En la Figura 4-5 se puede apreciar un diagrama de la máquina de estados diseñada.



**Figura 4-5: Máquina de estados que gestiona la actividad de los nodos**

En cada iteración, todos los nodos sufren una transición de estado, atendiendo a la figura anterior y condicionados a varios parámetros, explicados a continuación.

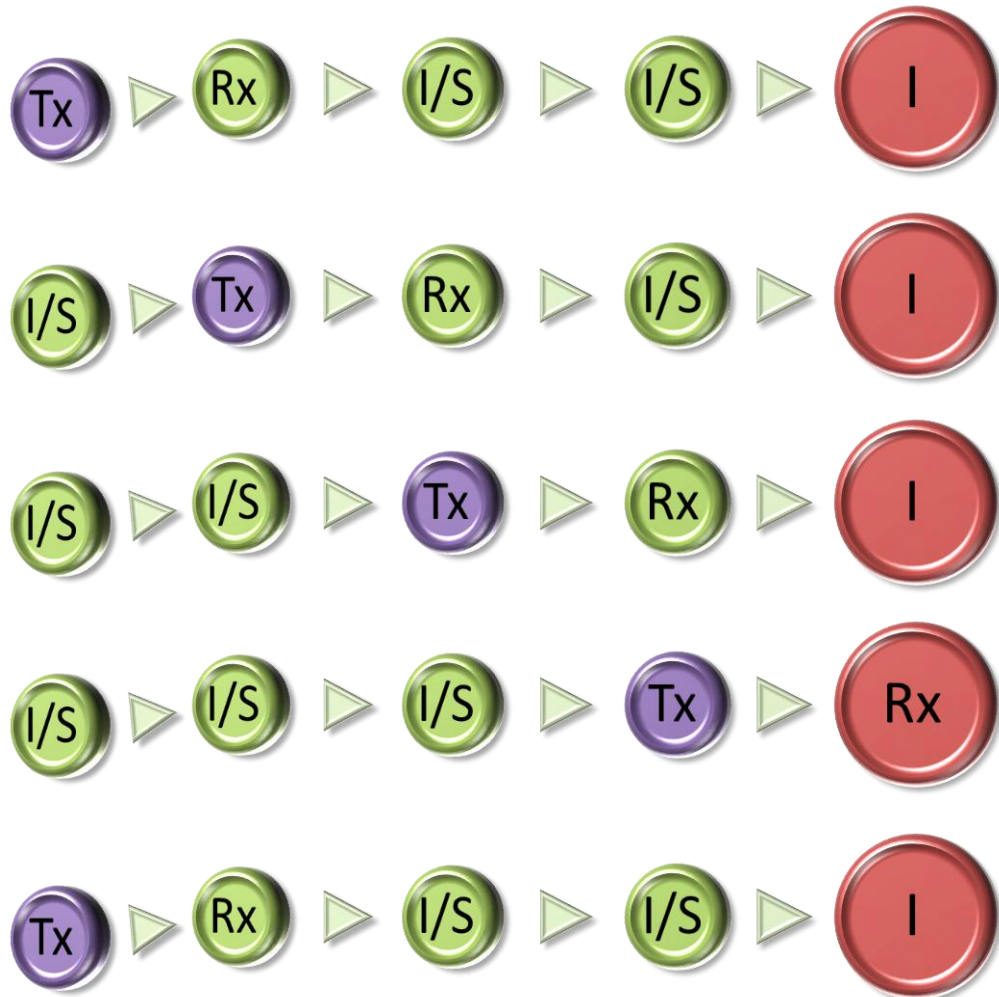
Para comprender esta máquina de estados, es necesario explicar el protocolo MAC empleado. Se ha implementado un protocolo basado en el VTS, explicado en el apartado 2.4.2, con algunas modificaciones.

El funcionamiento es sencillo. En cada instante de tiempo, sólo un nodo puede transmitir un mensaje. Además, en ese mismo instante, el nodo que estaría al cargo de recibir ese mensaje deberá estar incondicionalmente en estado de recepción, dado que no podrá saber si el mensaje le va a llegar o no, y debe estar preparado. La modificación incluida aquí es que cuando un nodo que debe estar en recepción no detecta ninguna actividad en el canal, vuelve a estado Idle, consumiendo así mucha menos energía ( $E_{RX\_no\_msg}$ ).

Durante ese tiempo, el resto de los nodos podrán estar bien en Idle, o bien en Sense, dado que las medidas se tomarán o no con una probabilidad  $P_S$ . Esta probabilidad se ajusta en función del número de nodos de la red, ya que si se realiza la toma de datos con demasiada frecuencia, la red se satura y se pierde el efecto embudo, que hace que sea el penúltimo nodo el que más carga de transmisión soporte, pasando a igualar dicha carga para los nodos previos.

En definitiva, en cada momento habrá un nodo en estado Rx (que consumirá un valor u otro, en función de si se ha transmitido un mensaje o no), uno o ninguno en estado Tx, y entre N y N-2 en estados Idle y Sense.

El comportamiento se refleja en la siguiente imagen con una red en línea de 5 nodos, en la que el último ejerce de estación base.

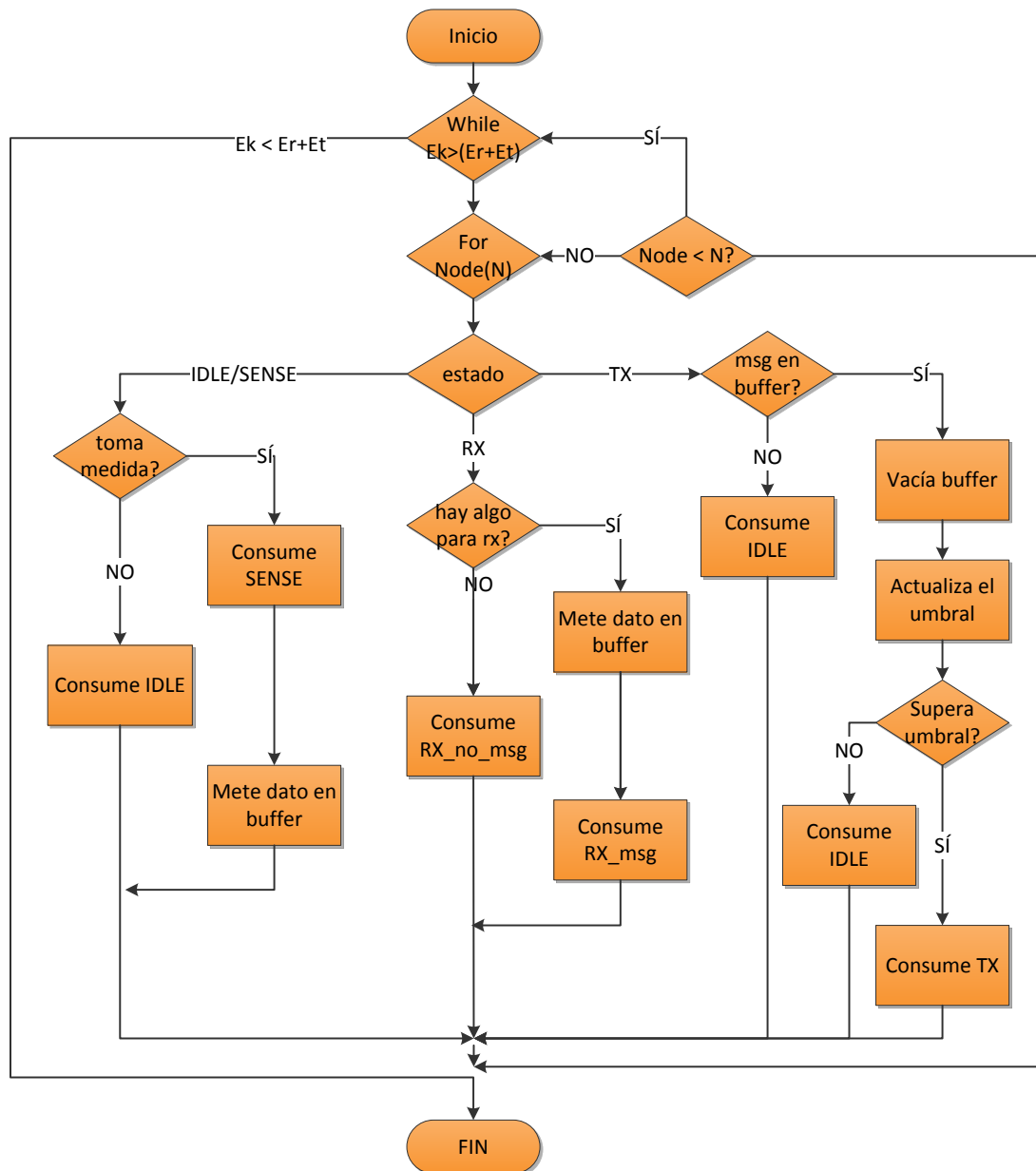


**Figura 4-6: Sucesión de estados en una red en línea**

Se debe apreciar que el primer nodo nunca estará en estado Rx, pues es imposible que pueda recibir ningún mensaje, y la estación base, por cuestiones obvias, nunca utiliza el modo Tx.

El diagrama de la Figura 4-7 plasma la ejecución de una simulación para un umbral dado.

- El bucle *while* hace que la ejecución continúe hasta que la batería de algún nodo se agota.
- El bucle *for* permite que en cada iteración del bucle anterior todos los nodos de la red puedan ejecutar su acción correspondiente, en función del estado en el que estén en ese momento.



**Figura 4-7: Diagrama de flujo para simular redes en línea**

El por qué de la necesidad de una probabilidad de sensado baja reside en el buffer utilizado. Este buffer va almacenando todos los mensajes que están a la espera de ser enviados en un nodo, ya hayan sido generados tras tomar una medida o hayan sido recibidos desde otro nodo. Del mismo modo, estos mensajes se van eliminando del buffer una vez que son transmitidos al siguiente nodo.

Si la densidad de mensajes en la red debido a una alta probabilidad de sensado es muy elevada, los buffers de los nodos comienzan a llenarse más rápido de lo que son capaces de vaciarse, lo que hace que se pierda el efecto deseado, que es que el penúltimo nodo sea el que mayor carga de transmisión soporte.

El resultado sobre la simulación es que no siempre es el mismo nodo el primero en agotarse, por lo que cada punto de la gráfica puede tener referencias distintas, dando lugar a representaciones erróneas.



### 4.3. Aplicación de los algoritmos

A modo de resumen, y con la intención de analizar hasta qué punto se pueden implementar en un entorno más realista las estrategias presentadas, se expone a continuación el modelo de escenario que presuponen.

Siendo  $\rho$  la función de costes que se utiliza para actualizar el umbral en cada decisión:

$$\rho = \frac{\mathbb{E}\{c_1\} - \mathbb{E}\{c_0\}}{\mathbb{E}\{c_0\}} \quad (4-6)$$

$$\mu_k = \frac{k_0}{k} \mu_{k_0} + \frac{\rho}{k} (x_k Q(x_k) - \mu_{k_0})^+ \quad (4-7)$$

Entonces  $\rho$ , para el caso LF puede expresarse:

$$\rho = \frac{(1 - P_I)E_T}{P_I E_I + P_R E_R + P_S E_S} \quad (4-8)$$

Partiendo del supuesto de que ningún nodo realizará una nueva medida mientras haya un mensaje en proceso de ser retransmitido hacia la estación base, la duración del estado de un nodo se puede definir como el tiempo que ocurre entre dos decisiones tomadas por ese nodo.

De esta forma, el coste por decidir no transmitir  $\mathbb{E}\{c_0\}$  será el acumulado desde la última decisión, el cual se puede repartir entre coste asociado a estado Idle, RX o Sense. El coste por decidir transmitir,  $\mathbb{E}\{c_1\}$ , será  $\mathbb{E}\{c_0\}$  más la energía empleada por la radio para transmitir el mensaje multiplicada por la probabilidad de haber recibido un mensaje o realizado una medición.

Para el caso GF, la expresión que aparece en [8] es:

$$\rho = \frac{\bar{P}_I E_i + (1 - \bar{P}_I)(E_t + E_r)}{E_i(1 - P_{S_N}) + P_{S_N} E_s} - 1 \quad (4-9)$$

No obstante, se ha detectado que la fórmula (4-9) es errónea cuando no se cumplen las asunciones que aparecen en el artículo que son  $E_R = E_S$  y  $E_I = 0$ . Por ello, para la implementación de las simulaciones de este proyecto se ha reelaborado la expresión para que se adecue a escenarios más genéricos:

$$\rho = \frac{(1 - \bar{P}_I) \left( (1 - P_{S_N})(E_t + E_r - E_i) - P_{S_N}(E_t + E_r - E_s) \right)}{\bar{P}_I E_i + (1 - \bar{P}_I)(E_i(1 - P_{S_N}) + P_{S_N} E_s)} \quad (4-10)$$

Se mantiene la premisa de terminar una retransmisión hasta la base antes de introducir un nuevo dato en la red, pero esta vez actualizando los algoritmos desde el punto de vista del penúltimo nodo. Teniendo esto en cuenta, el coste por decidir no transmitir será la energía consumida en modo inactivo por la probabilidad de que este nodo no realice ninguna medida, más la energía consumida por tomar una medida por la probabilidad de ser él la fuente del dato.

El coste asociado a tomar la decisión de transmitir vendrá dado principalmente por la probabilidad de que llegue un mensaje al nodo final, ya sea recibido o sensado, multiplicada por el coste de energía de recibir o medir, según el caso.

Se ha de notar que éste es un algoritmo de cálculo centralizado, y hay que distribuir el valor del umbral hacia el resto de la red. Si se asume que se utilizan los ACK para difundir esta información, entonces cuanto más alejado esté el nodo de la estación base, más antiguos serán los umbrales que utilizará.

En línea con los objetivos marcados para este trabajo de aportar realismo a los algoritmos encontrados en la literatura, se ha diseñado un entorno en el que se gestionan los sucesos de forma concurrente. En otras palabras, es posible que un nodo realice una medición mientras un mensaje está todavía en tránsito de llegar a la estación base.

Con este cambio se pierde la trazabilidad contra las variables definidas en las fórmulas anteriores, como la probabilidad y el consumo de estado, por lo que es necesario redefinir la manera en la que se actualiza el umbral de transmisión.

Teniendo esto en cuenta, es necesario regresar a la fórmula genérica (4-6), la cual es sencilla de implementar en un entorno simulado con un sistema centralizado para el cálculo del umbral, ya que, como se demostrará más adelante, es preferible utilizar en toda la red el umbral calculado en el penúltimo nodo.

Siendo  $c_1$  el consumo del nodo N-1 entre dos veces que se decida transmitir, y  $c_0$  el producido entre dos veces que se decida no transmitir, se puede definir:

$$\mathbb{E}\{c_1\} = \frac{1}{k_1} \sum_{k=1}^{k_1} c_1^{(k)} \quad (4-11)$$

$$\mathbb{E}\{c_0\} = \frac{1}{k_0} \sum_{k=1}^{k_0} c_0^{(k)} \quad (4-12)$$

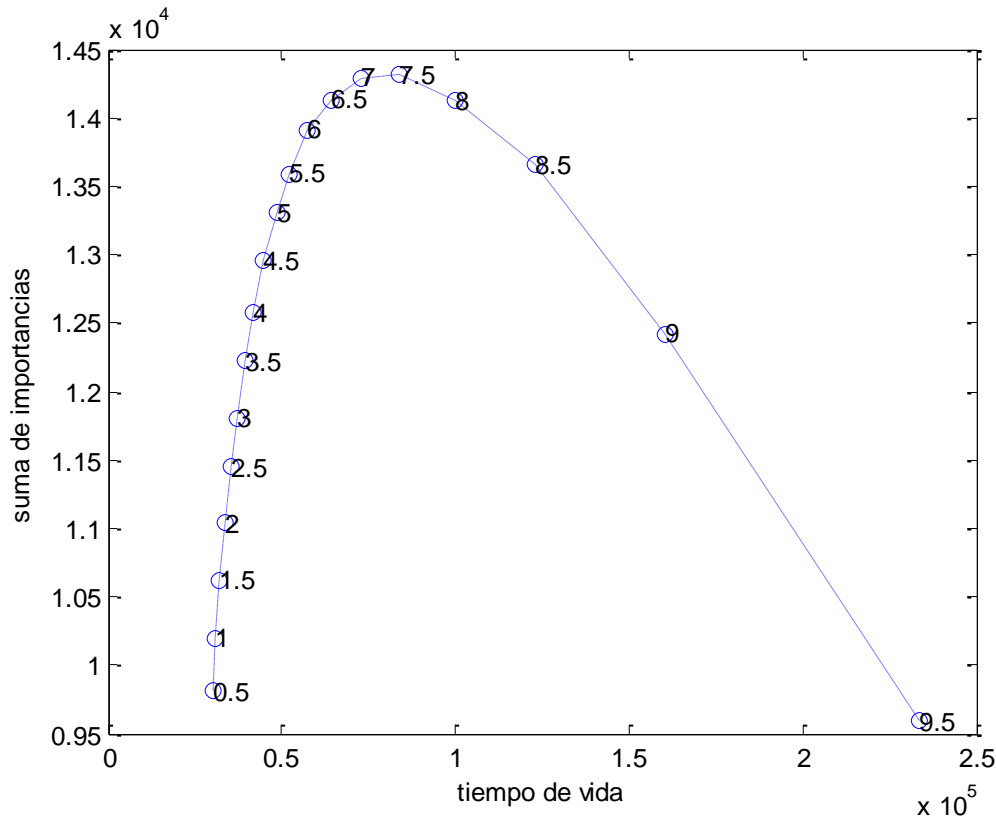
De nuevo, el umbral se calculará según (4-7).

En este caso, la difusión del umbral se realizará del mismo modo que para el algoritmo GF (ver Figura 2-1).

## 4.4. Modelo de resultados

Para facilitar el manejo de la información obtenida de las simulaciones, se presenta a continuación un ejemplo típico, sobre el que se explica cada parámetro relevante.

La curva de referencia para todos los resultados tendrá el siguiente aspecto:



**Figura 4-8: Gráfica de ejemplo con  $P_s = 0.04$ . Umbral de 0.5 a 9.5 en una red de 5 nodos**

Para cada uno de los escenarios definidos, se aplica sucesivamente el uso de umbrales de transmisión fijos, de forma que se toma uno, empezando por 0.5, se simula el escenario hasta agotar la batería del penúltimo nodo, y se pasa al siguiente valor.

Para cada umbral aplicado, los datos recogidos son los siguientes:

- Importancia total recibida: Este valor resulta de la suma de la importancia de todos los mensajes que consiguen llegar hasta la estación base, y es el objetivo a optimizar.
- Tiempo de vida de la red: Número de iteraciones que se han producido en la máquina de estados hasta que finalmente el penúltimo nodo se queda sin batería. Los nodos cambian su estado en cada iteración siguiendo las directrices de la Figura 4-5.
- Número de mensajes que llegan hasta la estación base.
- Nodo agotado: Según la previsión, este nodo siempre será el penúltimo, ya que se utilizarán siempre probabilidades de sensado lo suficientemente bajas como para evitar la saturación de la red.

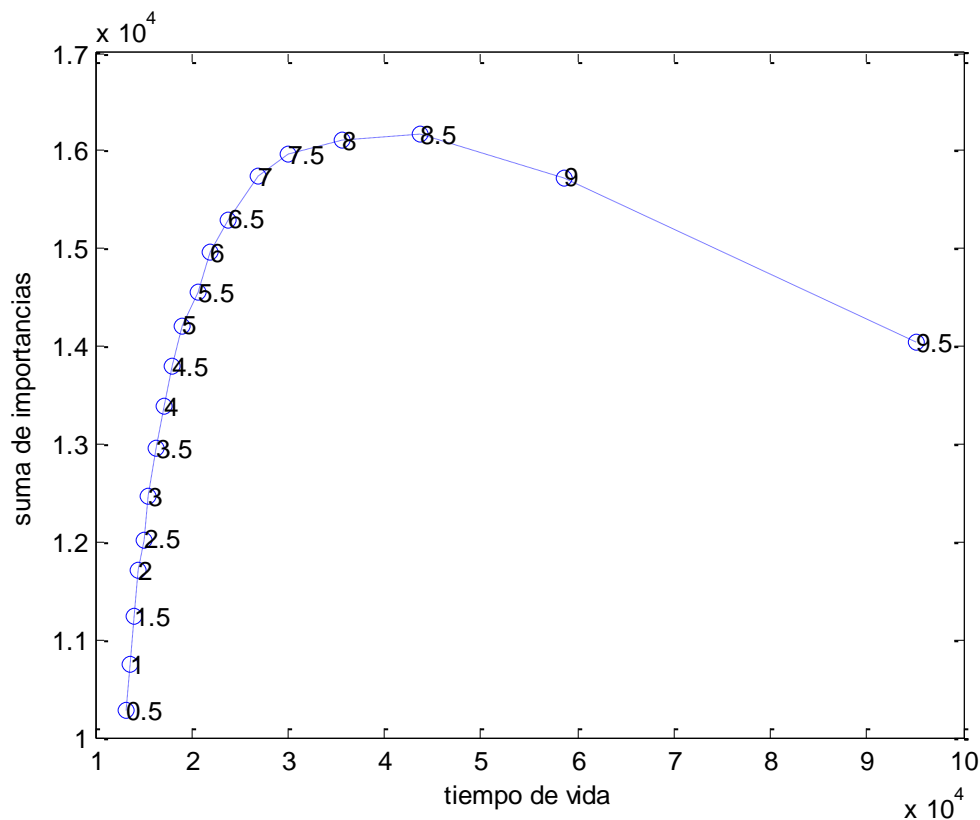
En la curva mostrada en la Figura 4-8 se representa, en el eje de las abscisas, el tiempo de vida de la red, y en el de ordenadas la importancia total recibida. De esta forma, el punto de inflexión superior coincidirá con el umbral óptimo para ese escenario, observado a posteriori (tras agotar la batería de los nodos).

Cada punto azul se representa en función de lo que haya vivido la red tras su empleo, y de la importancia total recibida. Aparecen en orden, de izquierda a derecha, desde  $\mu=0.5$  hasta  $\mu=9.5$ , en pasos de 0.5.

La lógica de la curva es que cuanto mayor es el umbral de transmisión, menos probable es enviar un mensaje, y más tiempo se pasa en estado Idle. Por ello, según aumenta el umbral, disminuye la cantidad de mensajes enviados, pero aumenta a cambio el tiempo de vida de la red.

La zona descendente de la curva representa el hecho de que con un umbral demasiado alto comienza a desperdiciarse energía a la espera de mensajes con la importancia suficiente para ser transmitidos.

Es sencillo concluir que cuanto mayor sea la probabilidad de sensado, mayor será el umbral que podrá permitirse la red, pues pasará menos tiempo esperando a que llegue un mensaje apto para ser transmitido. En la Figura 4-9, donde  $P_s$  es 5 veces mayor que la utilizada para obtener la Figura 4-8, puede observarse que el umbral óptimo es mayor.



**Figura 4-9: Gráfica de ejemplo con  $P_s = 0.2$ . Umbrales de 0.5 a 9.5 en una red de 5 nodos**

El programa de simulación devuelve también varios mensajes de seguimiento, en los que se puede apreciar de forma concreta los valores anteriores.

# Capítulo 5

## Escenarios y resultados

Con el objetivo de evaluar los algoritmos de descarte de mensajes propuestos, se plantearán distintos escenarios, con grado de complejidad ascendente, en los que se evaluarán las estrategias que sean de aplicación.

Para cada uno de estos escenarios, se presentará la siguiente información, apoyada en los resultados de las simulaciones.

### Definición del escenario

- Topología utilizada. Será fundamentalmente la de red en línea, aunque se probará también en los últimos casos de aplicación algunos casos de red de árbol.
- Número de nodos.
- Resultados esperados a priori.

### Parámetros de configuración bajo test

- Distribución de probabilidad de la importancia de los datos tomados, y por consiguiente, de los mensajes a enviar.
- Probabilidad de tomar datos. Cuanto mayor sea esta probabilidad, más saturada de mensajes estará la red.

### Conclusiones

- Ventajas de un algoritmo frente a otro
- Diferencia con respecto al caso óptimo, obtenido de forma empírica a posteriori.

## 5.1. Topología de red en línea

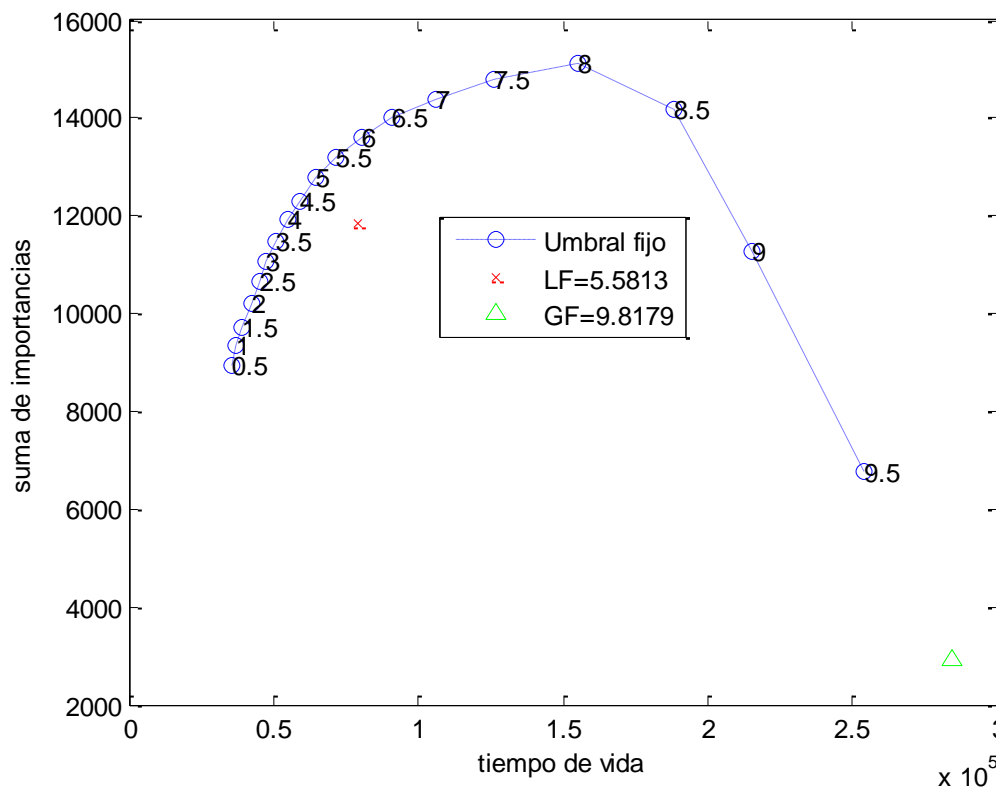
El tipo de red que se simulará en los siguientes subapartados será la red en línea (Figura 2-4), variando el número de nodos de los que está compuesta.

De aquí en adelante, para una red de N nodos, siempre habrá uno de ellos actuando como estación base, y N-1 nodos generando y retransmitiendo mensajes hacia ella.

### 5.1.1. Red con 3 nodos

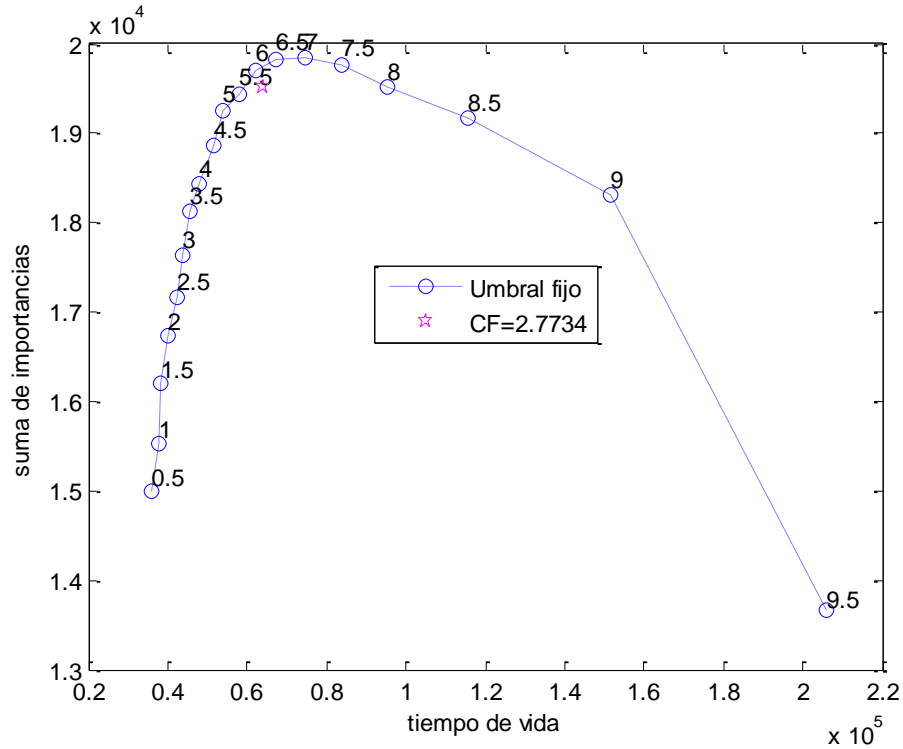
Para evaluar estrategias de descarte de mensajes que provengan bien de otros nodos de la red, o de los sistemas de medida incorporados en el propio dispositivo, la red más pequeña que tiene sentido comenzar a estudiar es una red en línea con tres nodos.

#### 5.1.1.1. Importancias con distribución de probabilidad uniforme



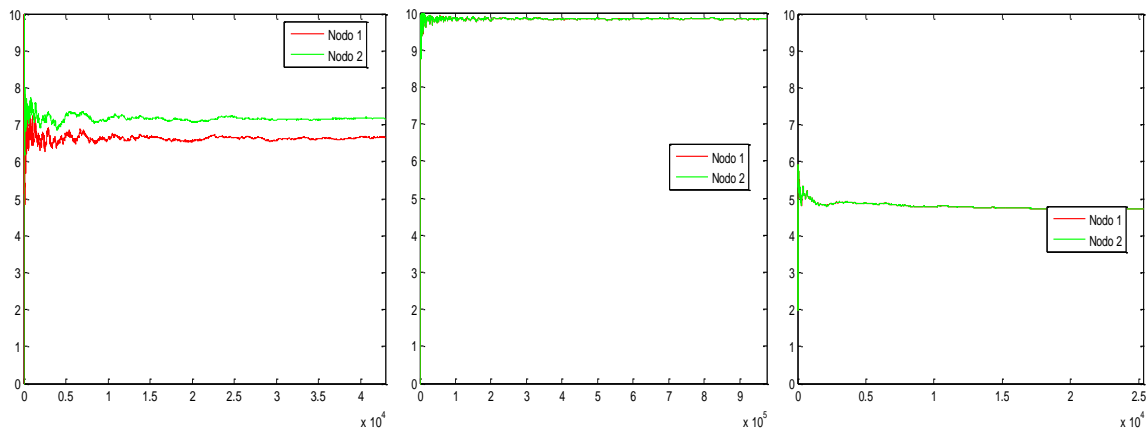
**Figura 5-1: Rendimiento de los algoritmos en una red de 3 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple**

El resultado más notable en este primer caso sencillo es el rendimiento tan bajo que ofrece el algoritmo GF. Se concluye que para una red tan pequeña, en la que los nodos tienen una gran probabilidad de transmitir y recibir, un algoritmo centralizado de este tipo no ofrece buenos resultados. El caso descentralizado LF ofrece un resultado algo mejor, pero aún lejos del que se obtendría con un umbral óptimo.



**Figura 5-2: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 3 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente**

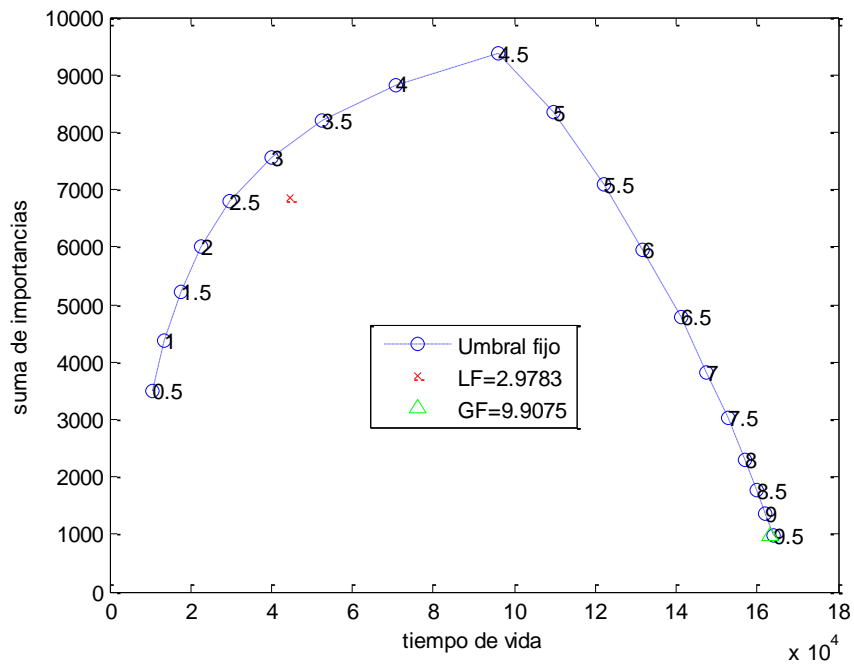
La suma de importancias alcanzada en este caso está mucho más cerca del caso óptimo, dada la forma de calcular el umbral, que se adapta en tiempo real al coste exacto implicado por decidir transmitir y descartar un mensaje, en lugar de atender a datos estimativos.



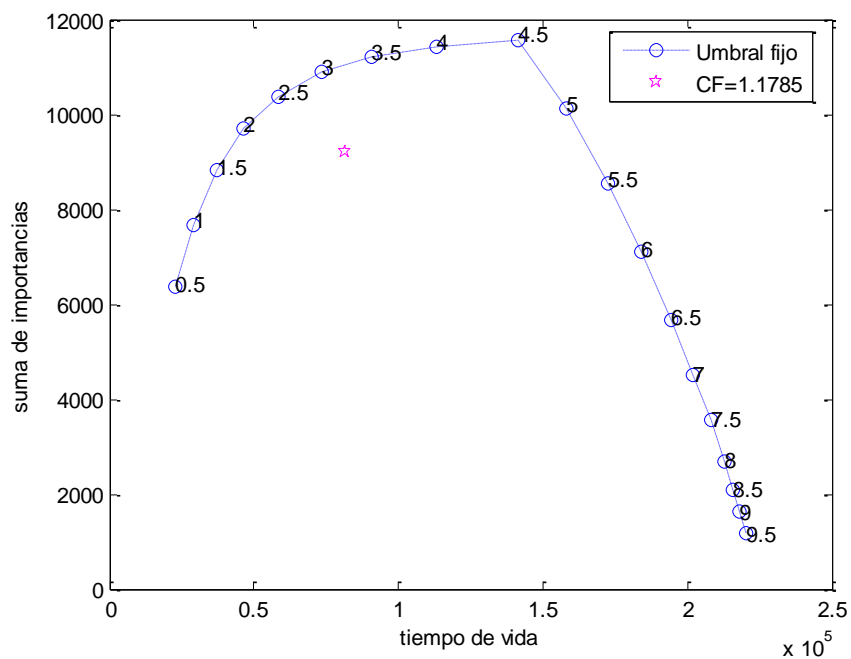
**Figura 5-3: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme**

Al observar la evolución de los umbrales de transmisión se aprecia que alcanzan rápidamente su estado estacionario, debido fundamentalmente al carácter uniforme de la probabilidad del valor de la importancia de los mensajes, y a que haya tan pocos nodos en la red.

### 5.1.1.2. Importancias con distribución de probabilidad exponencial



**Figura 5-4: Rendimiento de los algoritmos en una red de 3 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple**

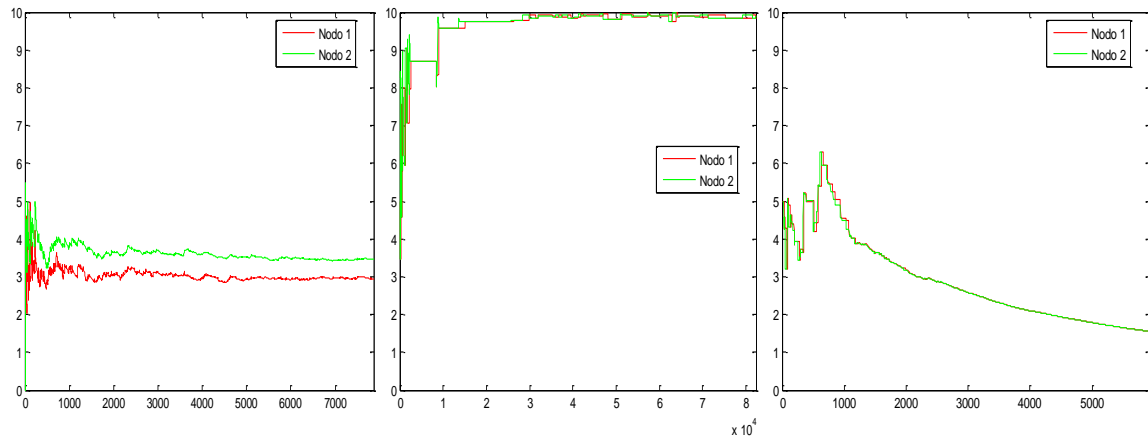


**Figura 5-5: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 3 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente**

La curva se incrementa con forma logarítmica según se aproxima al umbral óptimo, pues cuanto mayor es la importancia menor es la probabilidad de que se genere un mensaje con ella. Por esta misma razón la curva decrece tan bruscamente pasado el umbral de 4.5.

El rendimiento en los tres casos se mantiene similar al que se aprecia para el caso uniforme.





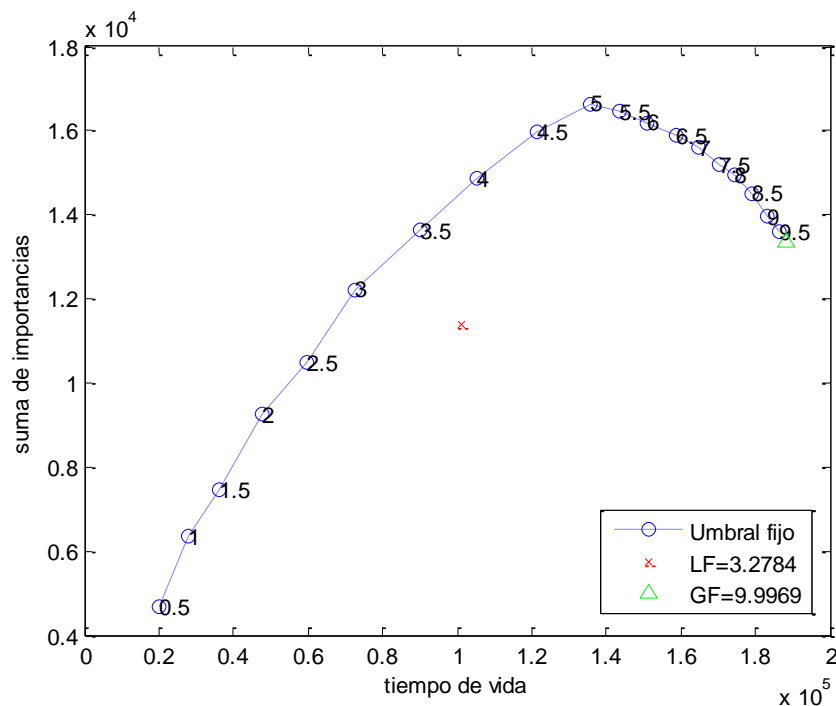
**Figura 5-6: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial**

En este caso, los tres algoritmos presentan un mayor tiempo transitorio hasta estabilizarse, debido a la no uniformidad de los datos.

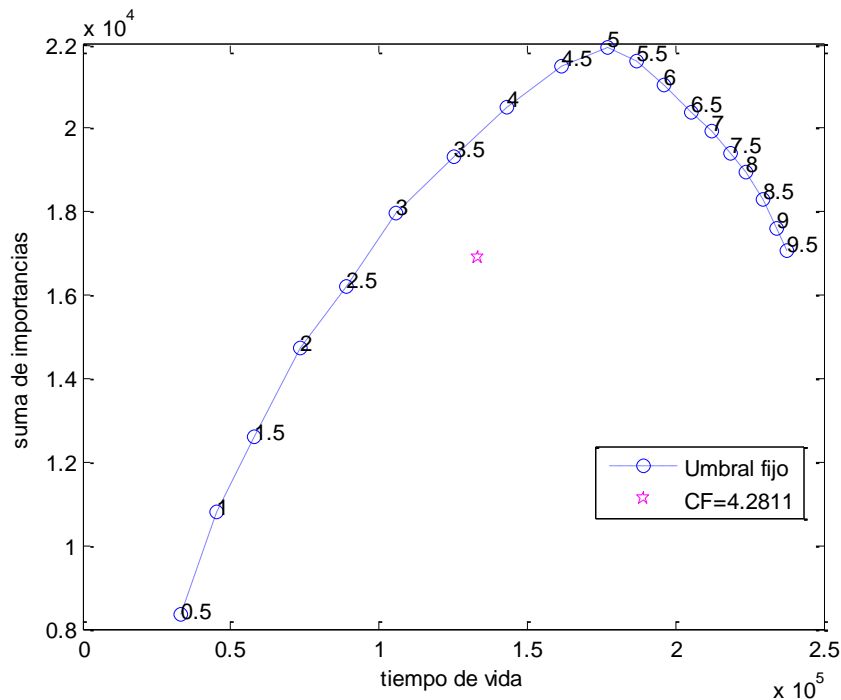
En los casos centralizados (GF y CF) además, teniendo en cuenta que el umbral sólo se recalcula cada vez que se ha de decidir sobre un mensaje, y que en este caso será más improbable que éstos alcancen el nodo N-1, el umbral se actualizará de forma más infrecuente, aumentando su tiempo transitorio.

### 5.1.1.3. Importancias con distribución de probabilidad de Pareto

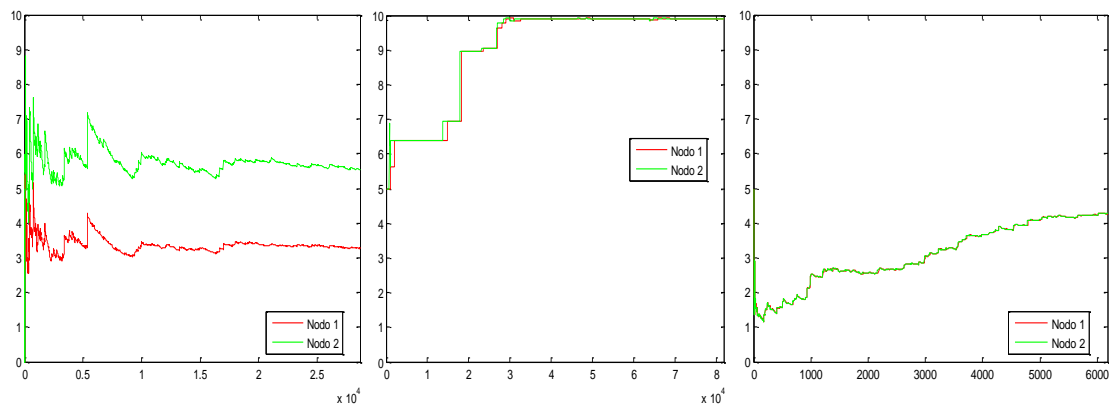
Este caso extremo supondrá el mayor desafío para las estrategias de comunicación selectiva. Representa una situación en la que se da una gran afluencia de mensajes de baja importancia, y eventualmente mensajes de mucha importancia.



**Figura 5-7: Rendimiento de los algoritmos en una red de 3 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple**



**Figura 5-8: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 3 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente**



**Figura 5-9: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto**

A la vista de las gráficas, se concluye que los resultados obtenidos con la implementación realizada para redes tan pequeñas no son fiables.

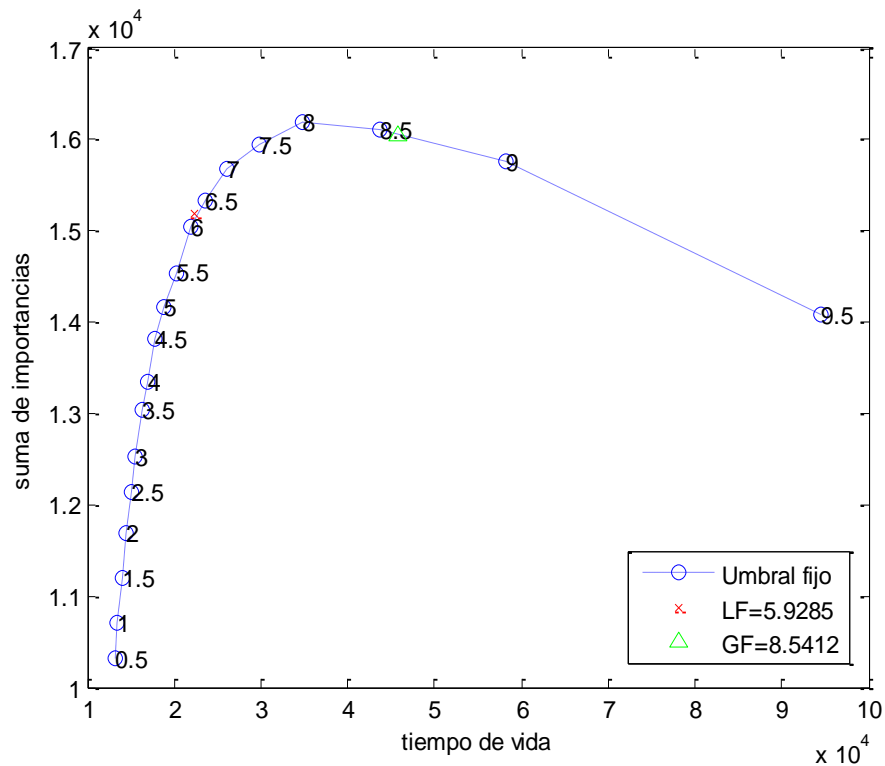
### 5.1.2. Red con 5 nodos

Se define para este conjunto de simulaciones una red en línea de cinco nodos, donde el nodo 5 hará las veces de estación base.

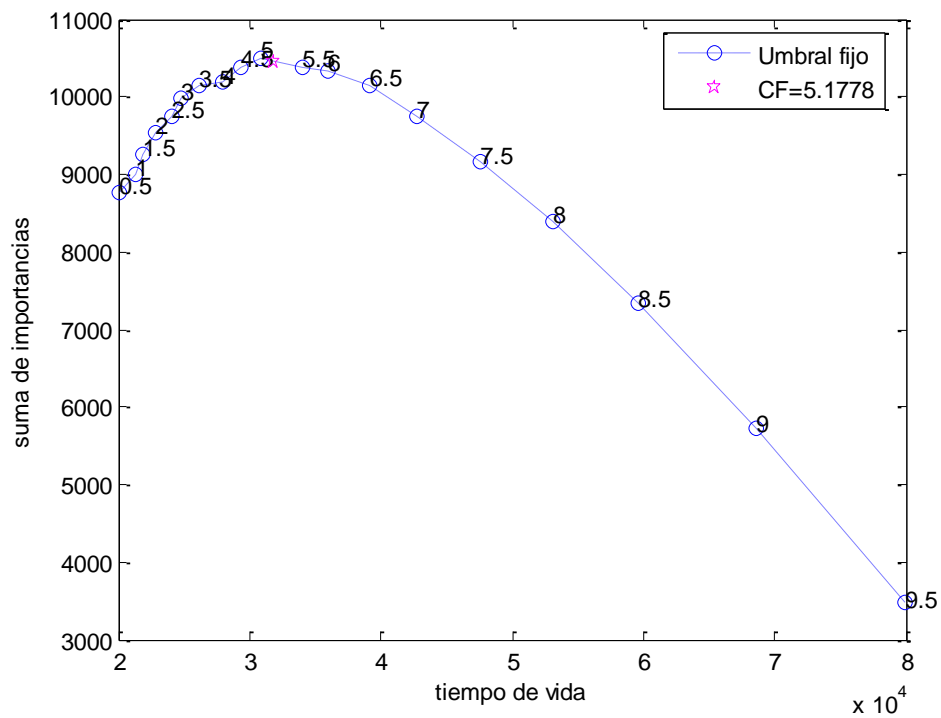
Una red con esta cantidad de nodos es ya un modelo mucho más fiable para evaluar los algoritmos bajo análisis.

A partir de este punto, se ha tratado de evidenciar cómo afecta el número de nodos de los que consta la red a la eficiencia de los algoritmos tratados.

### 5.1.2.1. Importancias con distribución de probabilidad uniforme



**Figura 5-10: Rendimiento de los algoritmos en una red de 5 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple**

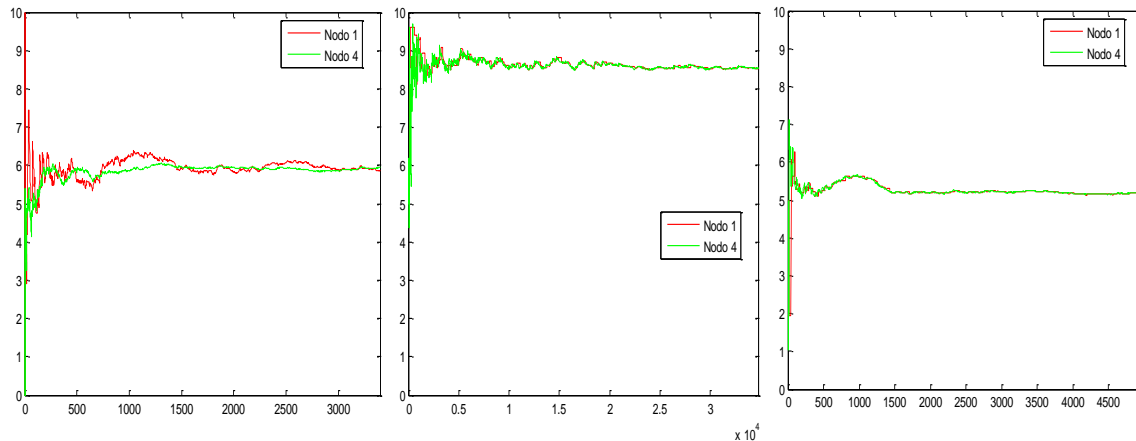


**Figura 5-11: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 5 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente**

Se comprueba efectivamente el rendimiento real de los algoritmos, que es mucho más satisfactorio que para el escenario anterior.

En el entorno sencillo se aprecia un resultado similar para los algoritmos LF y GF, si bien este último es algo mejor y está muy cerca del umbral óptimo.

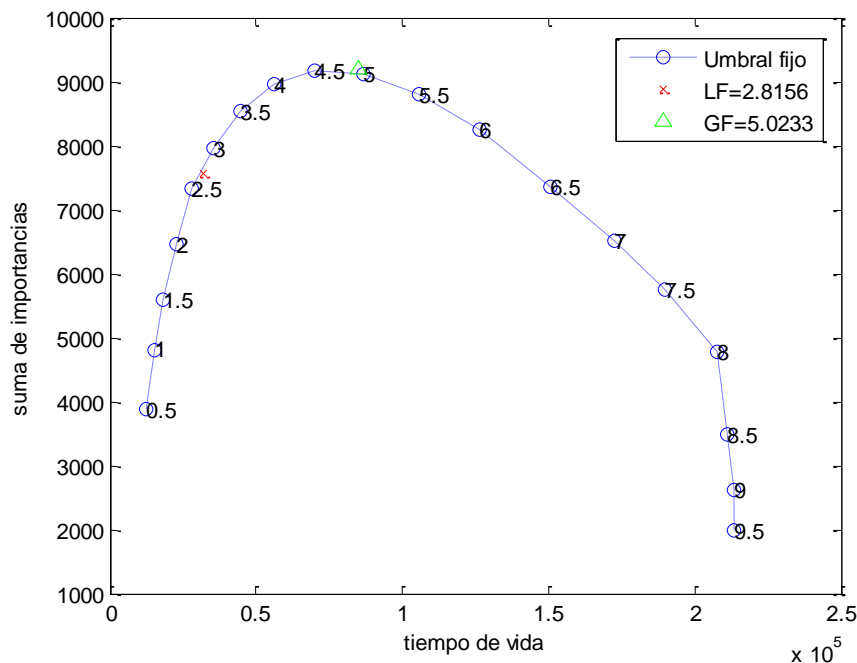
En el entorno concurrente se puede observar un comportamiento óptimo del umbral CF, que destaca como el mejor caso de la gráfica.



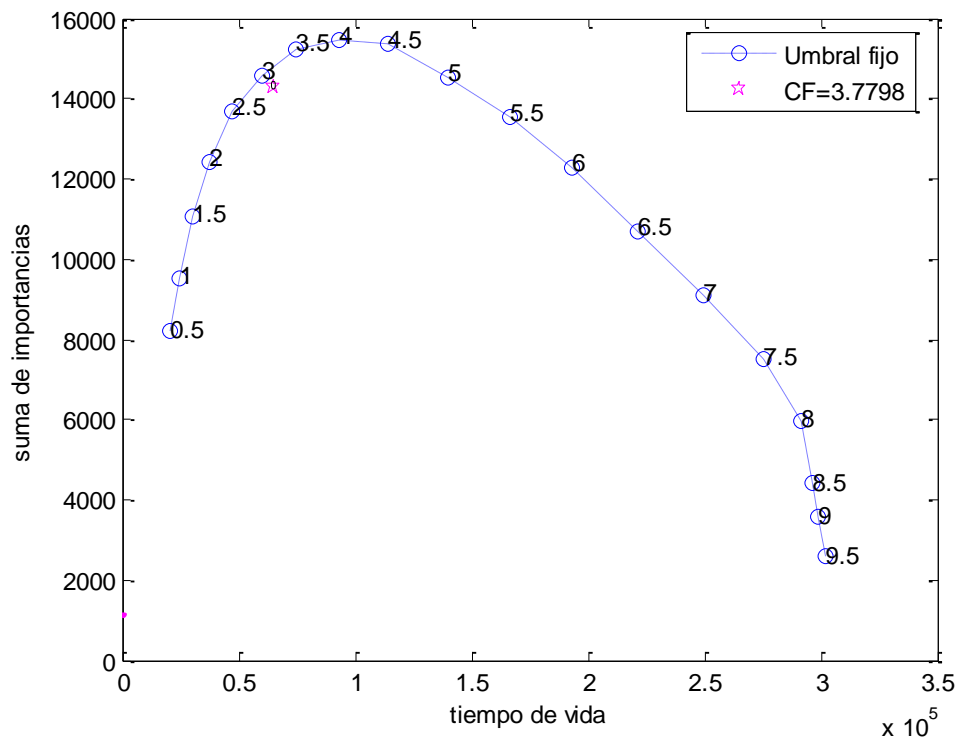
**Figura 5-12: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el cuarto nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme**

Como en el caso anterior, los umbrales permanecen en un nivel más o menos constante, debido al uso de la distribución uniforme.

#### 5.1.2.2. Importancias con distribución de probabilidad exponencial

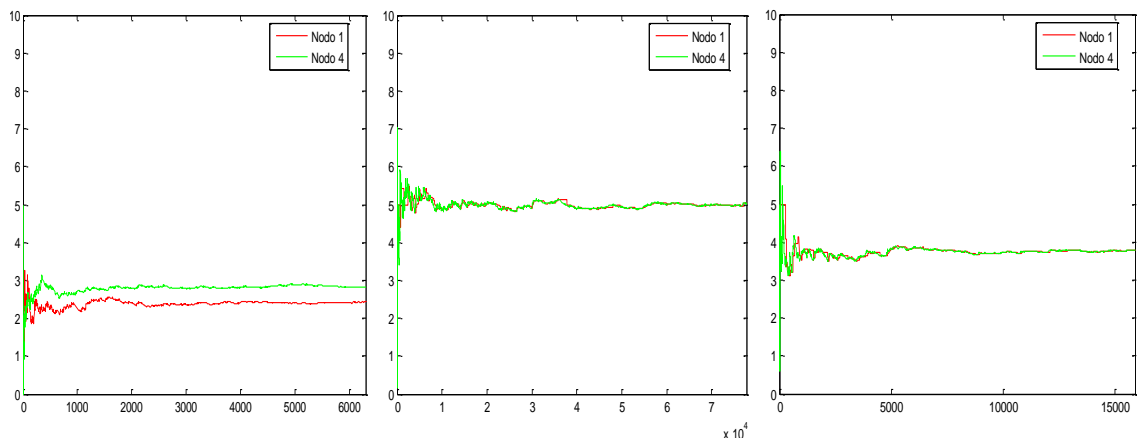


**Figura 5-13: Rendimiento de los algoritmos en una red de 5 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple**



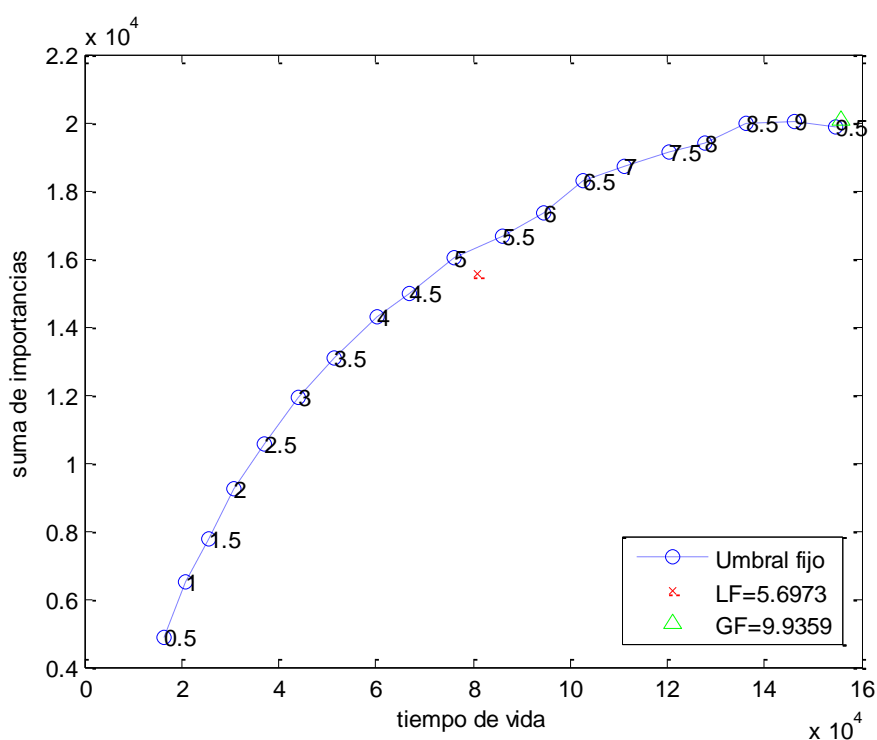
**Figura 5-14: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 5 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente**

Se observa que para el escenario simple el algoritmo GF mantiene una eficiencia muy buena, superior al caso LF. No obstante, en el caso concurrente se pone en evidencia un resultado algo peor para el algoritmo CF, por lo que se intuye una penalización para sus resultados cuando la distribución de importancias deja de ser uniforme.

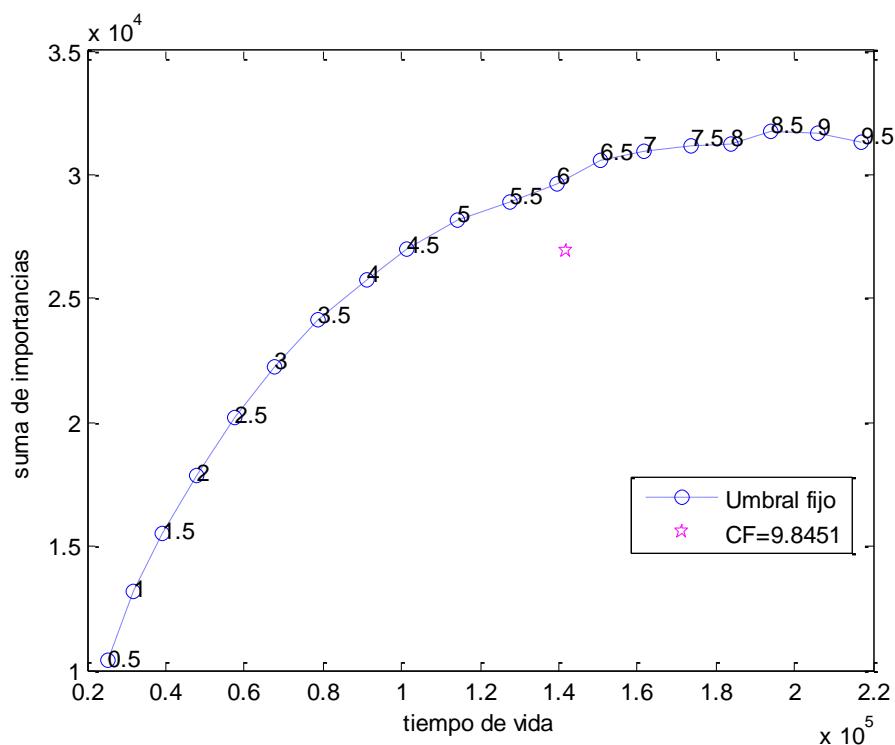


**Figura 5-15: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el cuarto nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial**

### 5.1.2.3. Importancias con distribución de probabilidad de Pareto



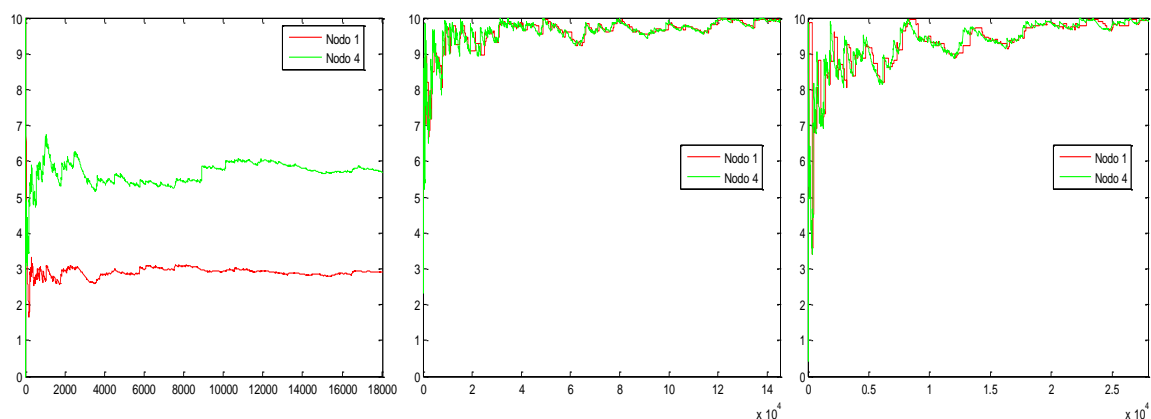
**Figura 5-16: Rendimiento de los algoritmos en una red de 5 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple**



**Figura 5-17: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 5 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente**

El primer comentario que cabe remarcar tras observar las gráficas resultantes es la forma de las mismas. Llama la atención el hecho de que no muestren el tramo descendente como hasta ahora. La explicación reside en esos pocos mensajes que, aunque lleguen de manera muy infrecuente, tienen una importancia muy elevada, y hacen que compense elevar el umbral de transmisión todo lo posible ya que uno solo de estos mensajes puede equilibrar el descarte de todos los mensajes anteriores de muy poca importancia.

En cuanto al comportamiento de los algoritmos, el caso GF mantiene su buena eficiencia, aunque el CF, igual que ocurriera para el caso exponencial, ha disminuido.



**Figura 5-18: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el cuarto nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto**

En la evolución de los umbrales se dilucidan varios aspectos que se acentuarán conforme se eleve el número de nodos de la red.

Se ve claramente como los valores de umbral para el caso descentralizado (izquierda) difieren sensiblemente para cada nodo.

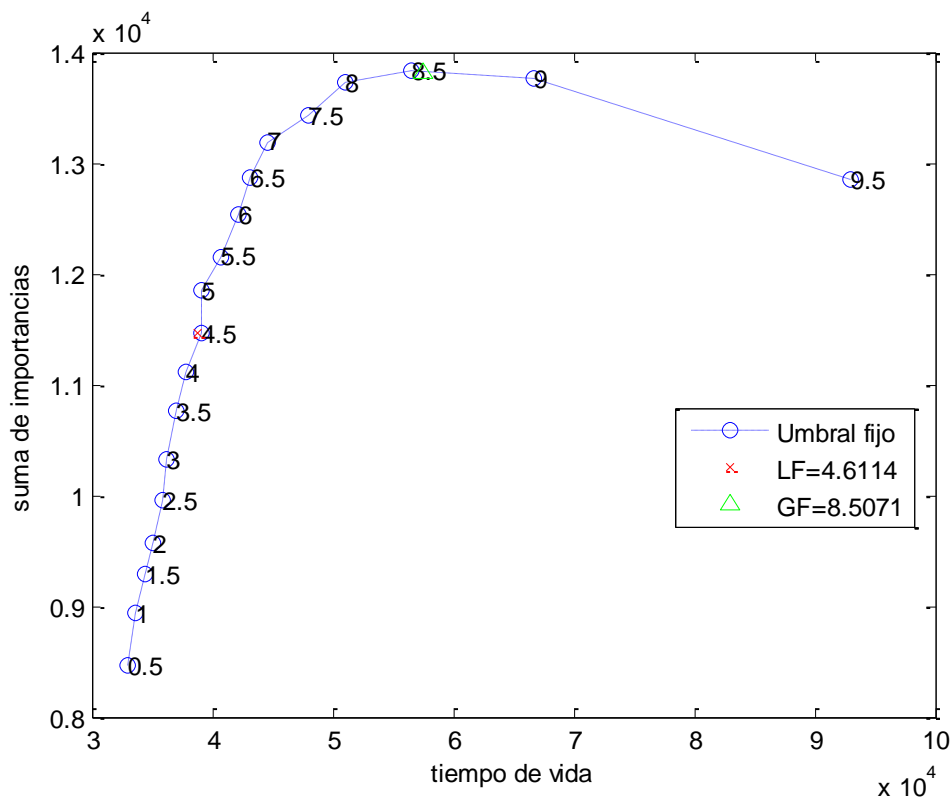
Para el caso centralizado, se observa cierto retraso entre los niveles del umbral de transmisión del nodo N-1, encargado de actualizar su valor, y del primer nodo, que utiliza el umbral que le llega con cada asentimiento de mensaje.

### 5.1.3. Red con 20 nodos

Una red de 20 nodos en línea comienza a presentar la complejidad suficiente como para poner a prueba los algoritmos de comunicación selectiva estudiados.

Es de esperar que en una red con tantos nodos la diferencia entre los algoritmos CF y GF, con respecto al caso descentralizado, LF, sea mucho mayor, ya que según se expuso en 2.1.1.3, en redes de mayor tamaño es preferible utilizar siempre un umbral basado en el estado del penúltimo nodo, que será el que más carga soporte.

### 5.1.3.1. Importancias con distribución de probabilidad uniforme



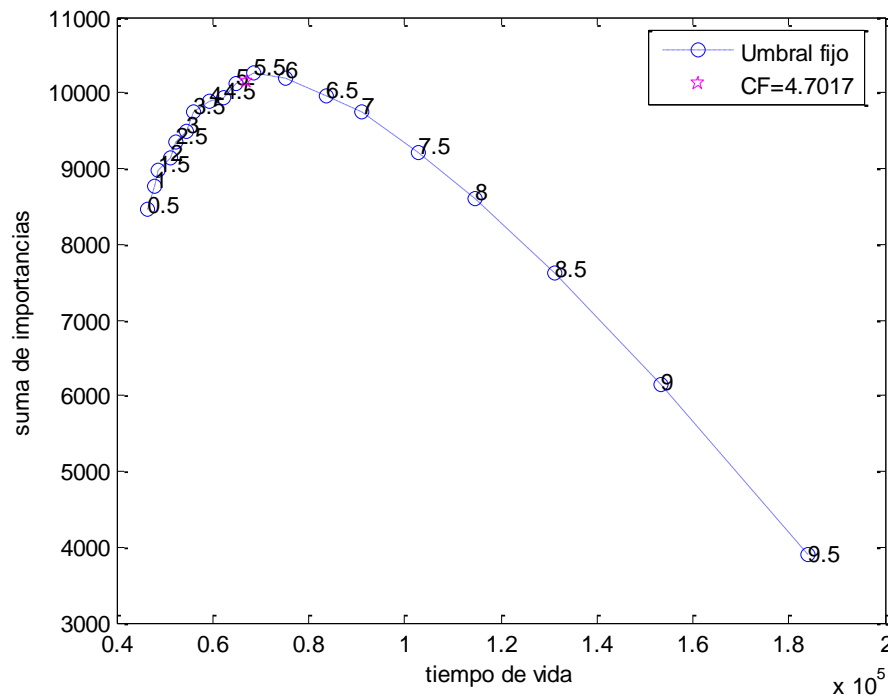
**Figura 5-19: Rendimiento de los algoritmos en una red de 20 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple**

El algoritmo centralizado GF mantiene su nivel de rendimiento aun para una red con tantos nodos como ésta, estando muy cerca del valor óptimo.

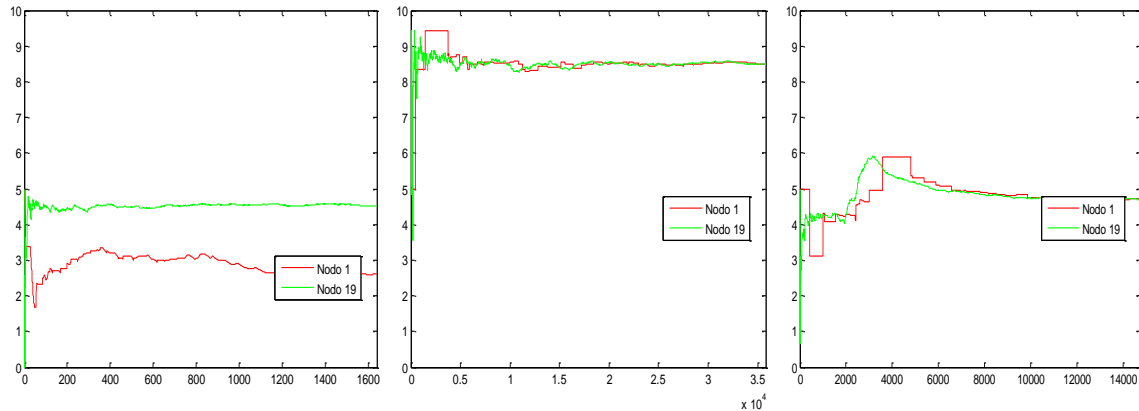
El comportamiento del LF refuerza la teoría planteada anteriormente, en la que se expone que cuantos más nodos hay en una red, más recomendable es utilizar un algoritmo centralizado en el penúltimo nodo.

En el escenario concurrente, el algoritmo centralizado CF sigue aportando unos resultados casi óptimos, lo que confirma su buen funcionamiento para una distribución de probabilidad de importancias uniforme.





**Figura 5-20: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 20 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente**



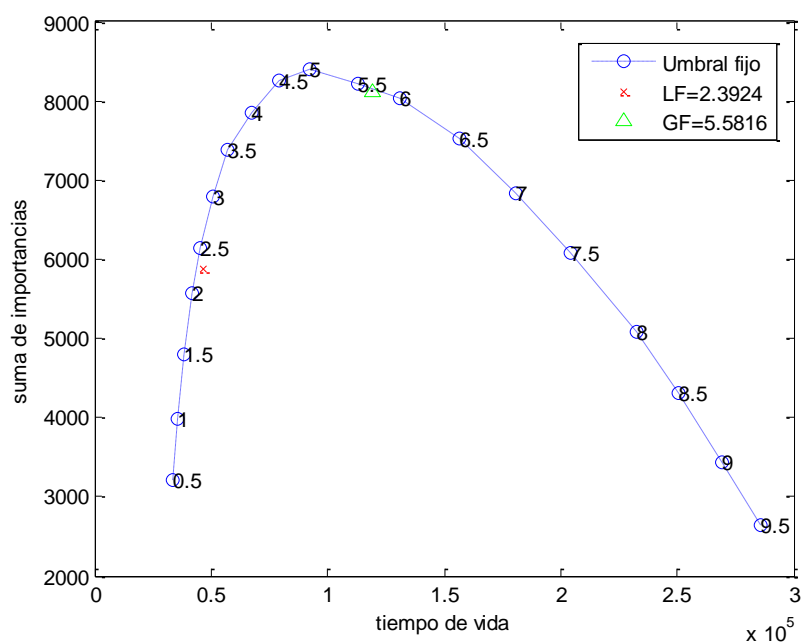
**Figura 5-21: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme**

A la vista de la evolución de estos umbrales de transmisión, se antoja cada vez más evidente la necesidad de ponderar el tiempo transitorio de cada algoritmo y el resultado final.

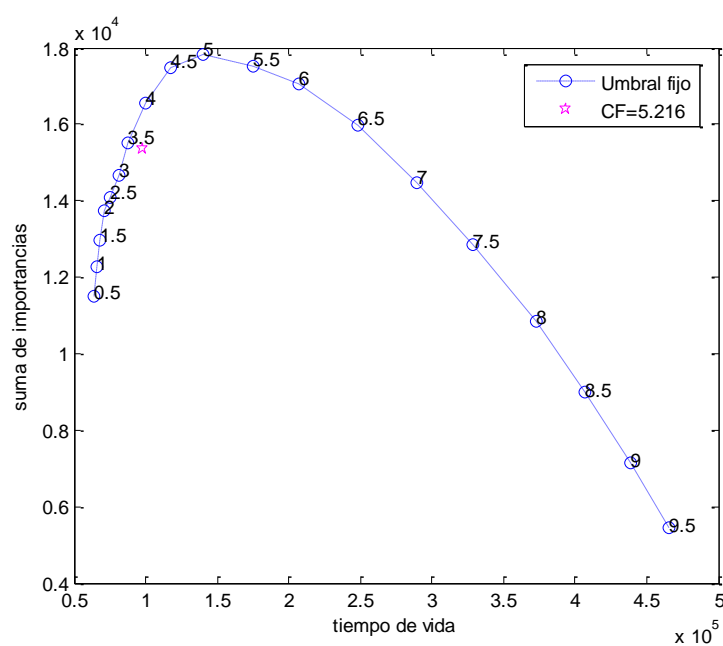
Para el caso descentralizado, los umbrales alcanzan su nivel estacionario más rápido que para el caso centralizado, que debe promediar los parámetros de todos los nodos para calcular el umbral, provocando una situación de cierta inestabilidad inicial.

La decisión pues de utilizar uno u otro algoritmo dependerá directamente del nivel de batería inicial de los dispositivos. Niveles más altos estarán mejor preparados para implementar los umbrales centralizados, obteniendo así mejores resultados.

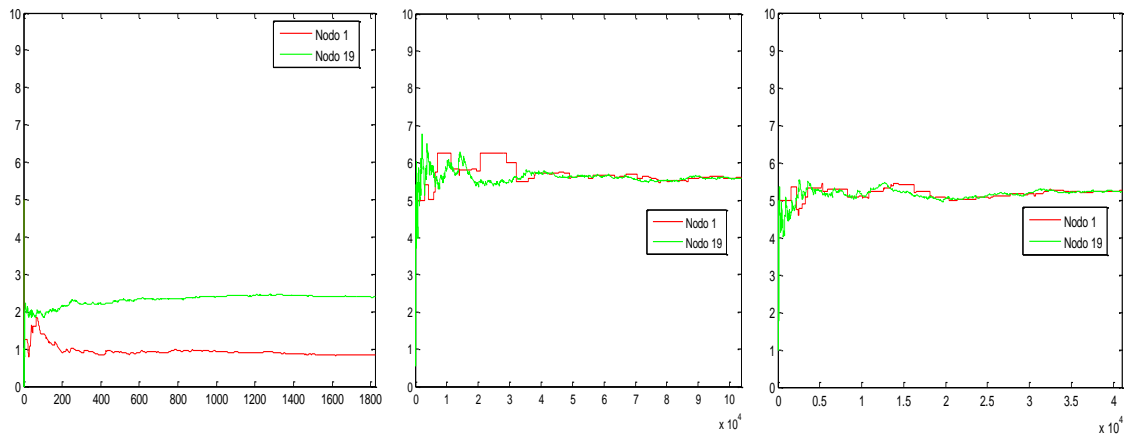
### 5.1.3.2. Importancias con distribución de probabilidad exponencial



**Figura 5-22: Rendimiento de los algoritmos en una red de 20 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple**



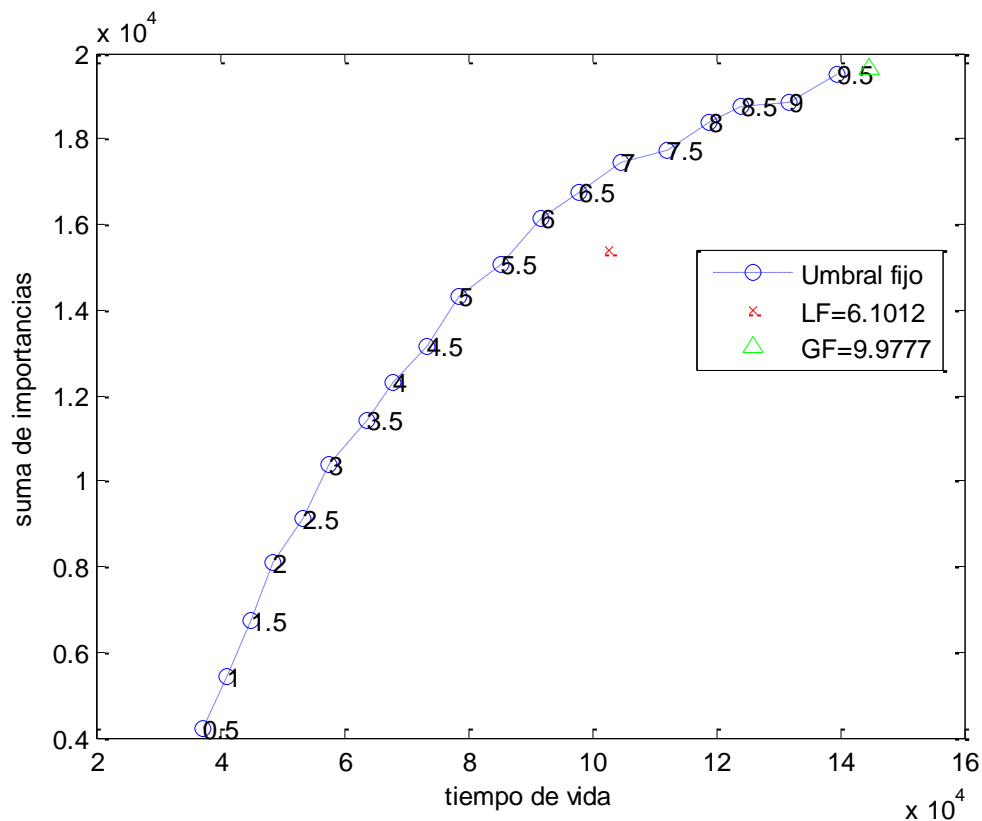
**Figura 5-23: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 20 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente**



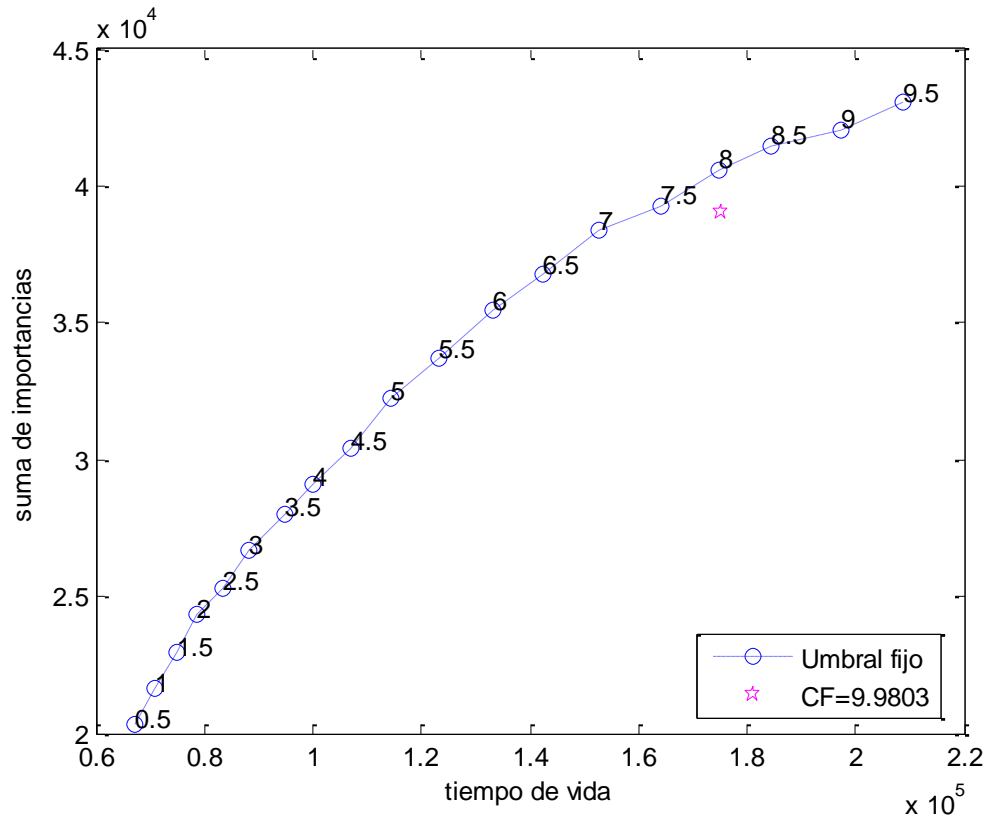
**Figura 5-24: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y el segundo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial**

Para el caso exponencial se observa un comportamiento correcto para el algoritmo GF, mientras que el CF ha perdido eficiencia en su entorno concurrente, al igual que se observó con la red de 5 nodos.

### 5.1.3.3. Importancias con distribución de probabilidad de Pareto

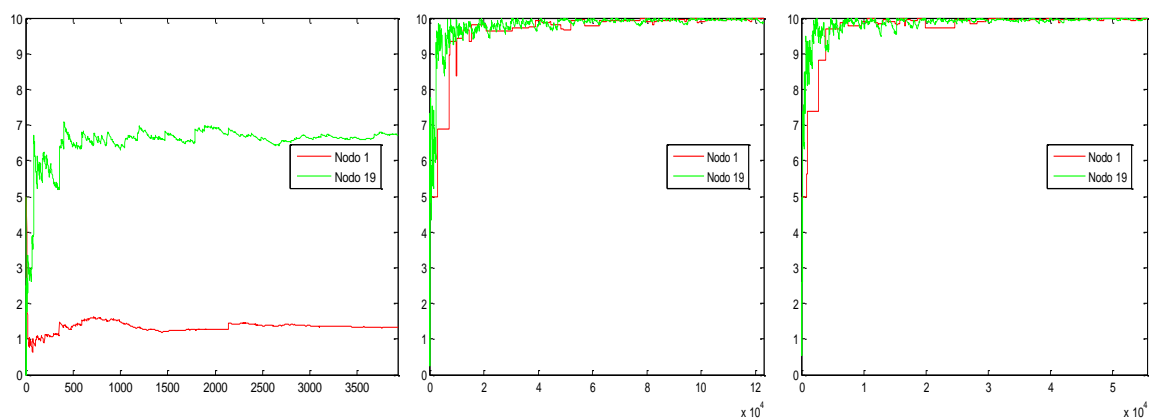


**Figura 5-25: Rendimiento de los algoritmos en una red de 20 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple**



**Figura 5-26: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 20 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente**

Se mantiene la tónica de la gráfica con respecto al caso con menos nodos, al igual que el comportamiento de los distintos algoritmos. Para una red con este número de nodos era de esperar el mal resultado del algoritmo LF. El CF pierde algo de eficiencia, tal y como ocurrió antes.



**Figura 5-27: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto**

El retardo de propagación del umbral se vislumbra ya como un problema a tener en cuenta, haciendo que los primeros nodos utilicen un umbral obsoleto en las primeras etapas de funcionamiento de la red.

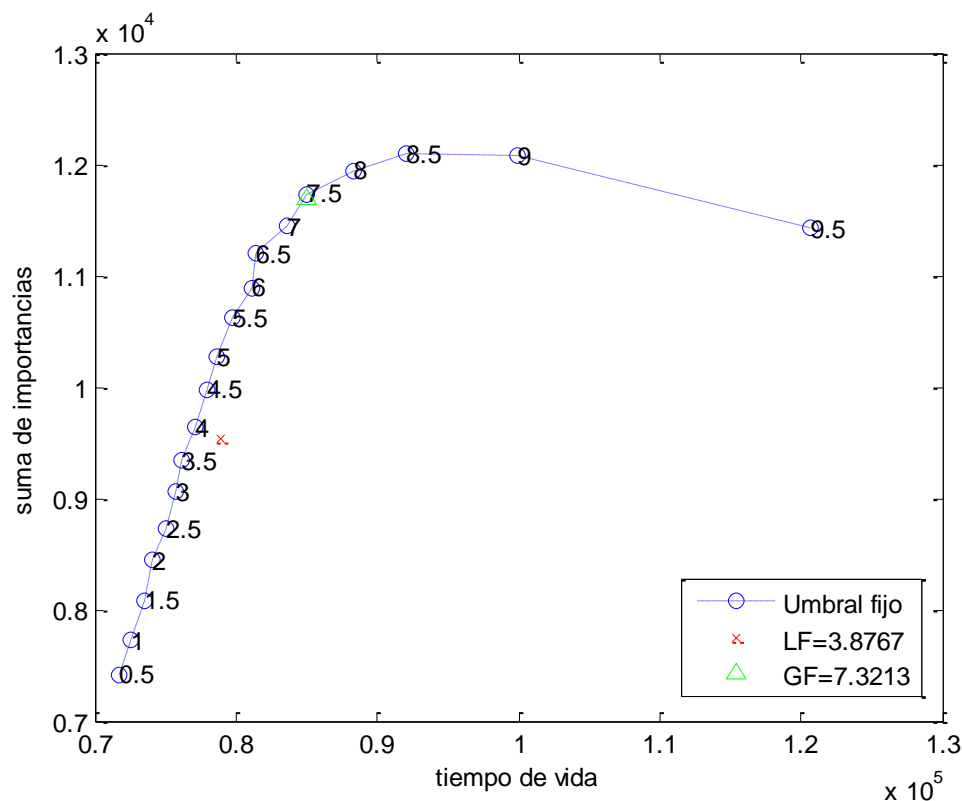
### 5.1.4. Red con 50 nodos

Alinear 50 nodos en una red será algo que se encuentre muy rara vez en una aplicación real, debido a los problemas que presenta, como la latencia que sufrirán los mensajes nacidos en los nodos más lejanos para llegar a la estación base.

Se presentan a continuación los resultados para esta red ya que son interesantes para ser interpretados como un caso extremo, que permitirá dilucidar con más claridad las diferencias entre las distintas estrategias.

Una red tan grande supondrá un reto para todos los algoritmos. En el caso descentralizado, los resultados tenderán a empeorar por las mismas razones que antes. En los casos GF y CF, se pondrá en evidencia un importante problema, y es la propagación del umbral desde el nodo N-1 hacia los anteriores

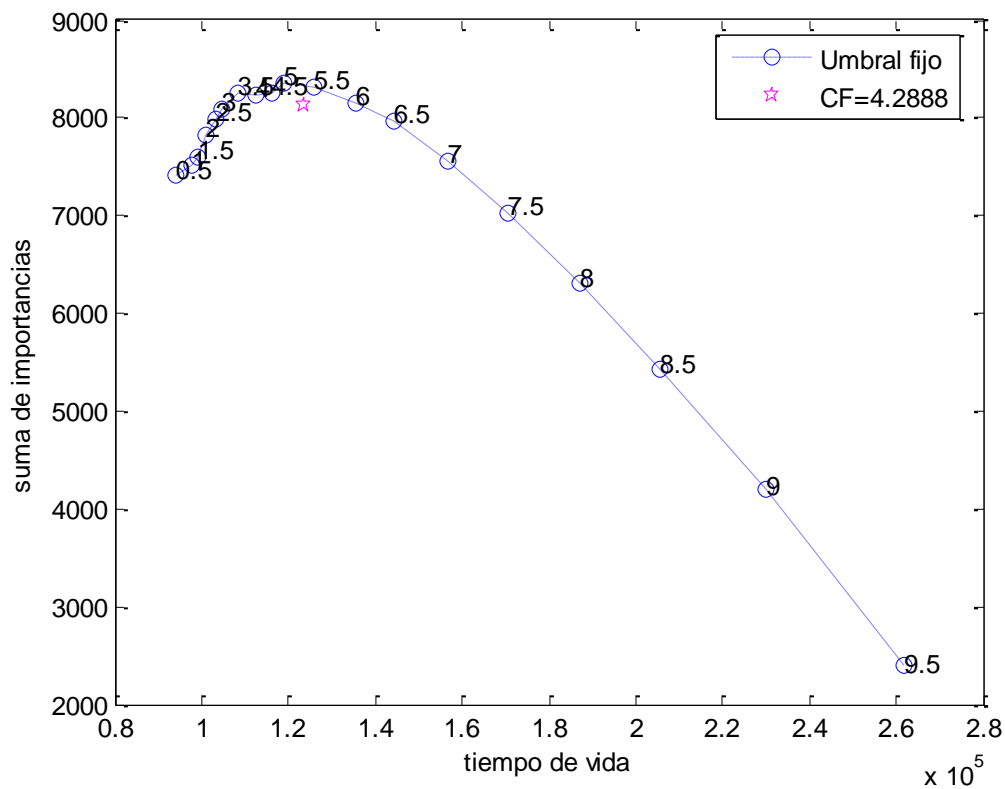
#### 5.1.4.1. Importancias con distribución de probabilidad uniforme



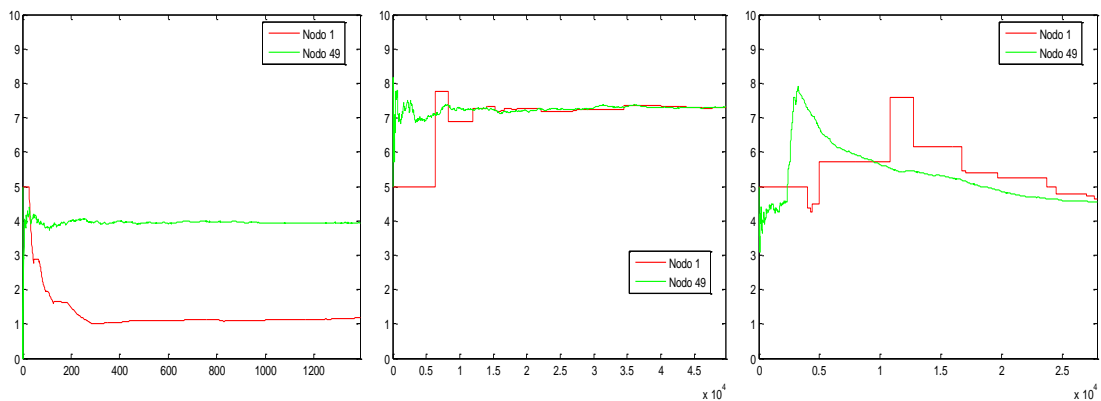
**Figura 5-28: Rendimiento de los algoritmos en una red de 50 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad uniforme en un escenario simple**

En este escenario todos los algoritmos disminuyen su eficiencia, un comportamiento esperado debido al elevado número de nodos de la red.

No obstante, el algoritmo GF se mantiene aun muy cerca del nivel óptimo, al igual que CF en el entorno concurrente.



**Figura 5-29: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 50 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad uniforme en un escenario concurrente**

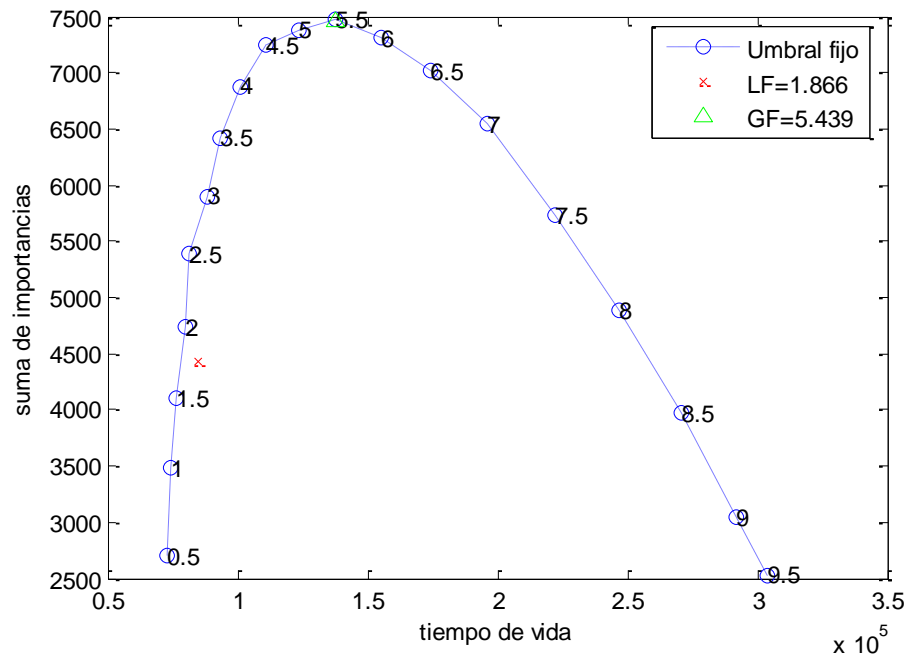


**Figura 5-30: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad uniforme**

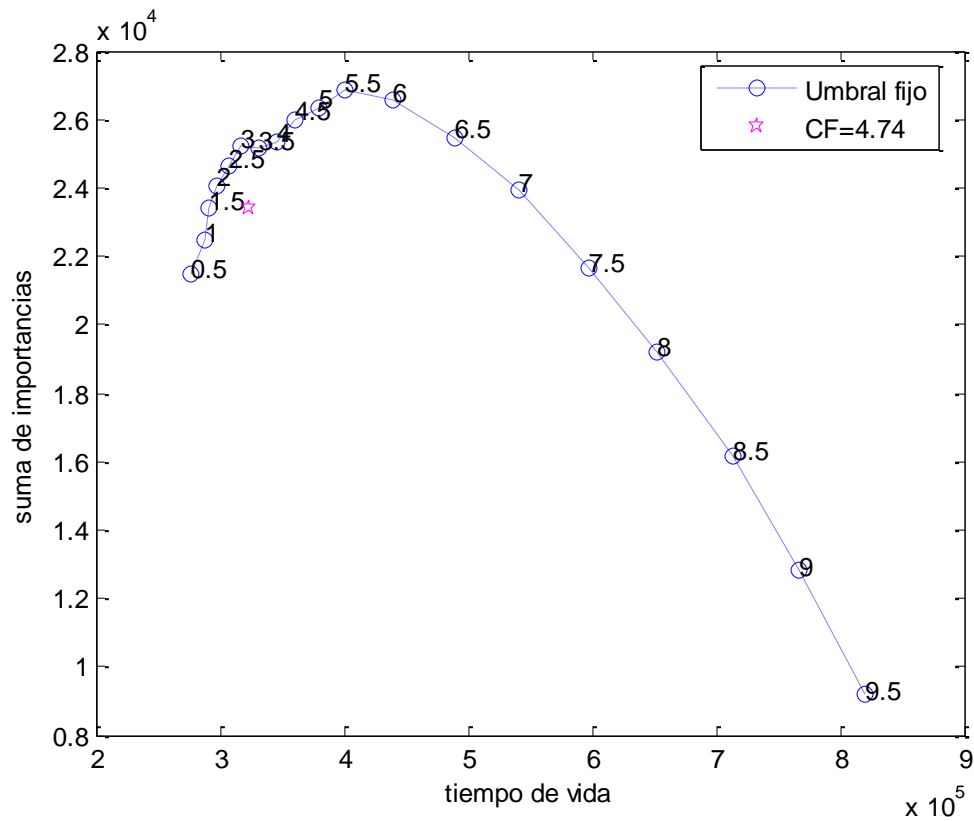
Como puede observarse, la propagación del umbral de transmisión en los casos centralizados se convierte en un verdadero problema debido a la latencia introducida por todos los nodos intermedios.

En cuanto al algoritmo LF, presenta un comportamiento lógico, dado que el nodo más cercano a la base sitúa su umbral de transmisión en un valor mucho más elevado que los primeros nodos de la red, ya que la carga de mensajería que soporta es mucho mayor.

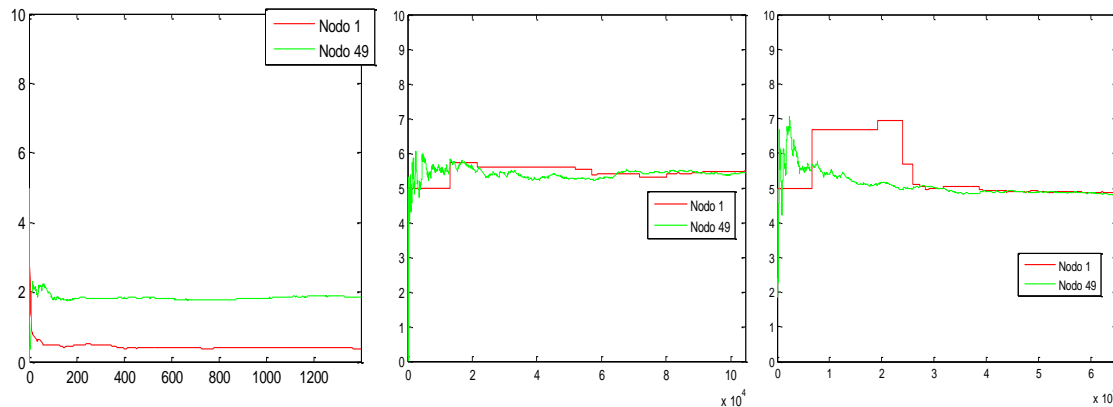
### 5.1.4.2. Importancias con distribución de probabilidad exponencial



**Figura 5-31: Rendimiento de los algoritmos en una red de 50 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad exponencial en un escenario simple**



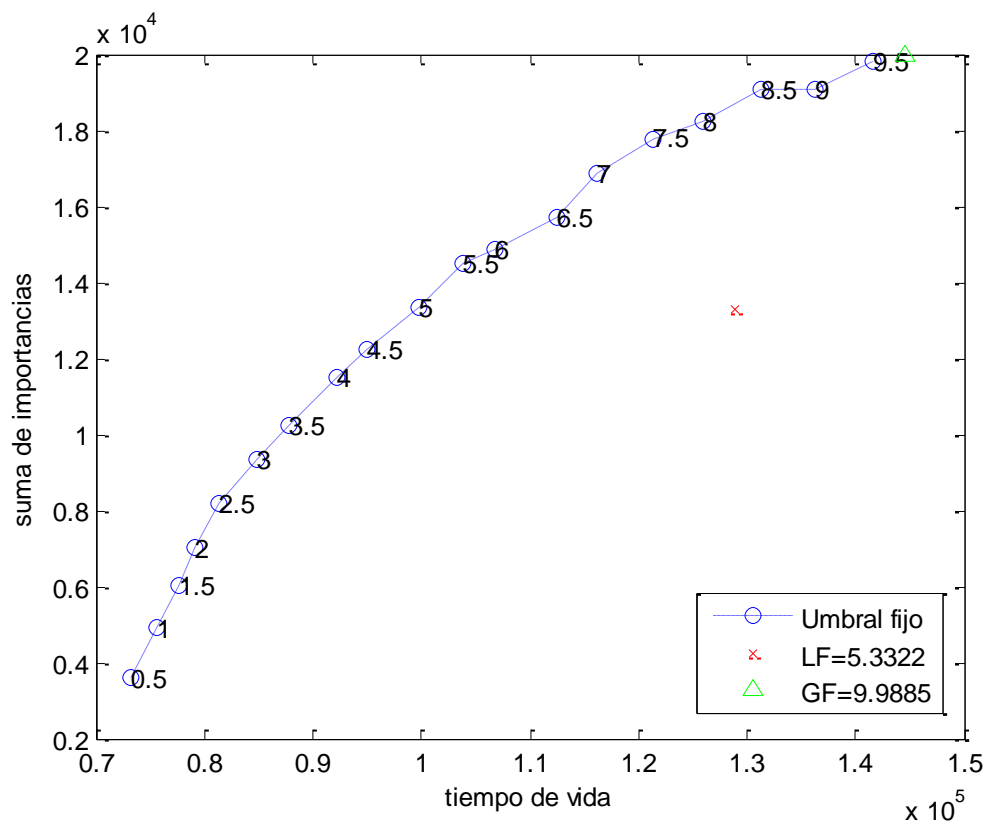
**Figura 5-32: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 50 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad exponencial en un escenario concurrente**



**Figura 5-33: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad exponencial**

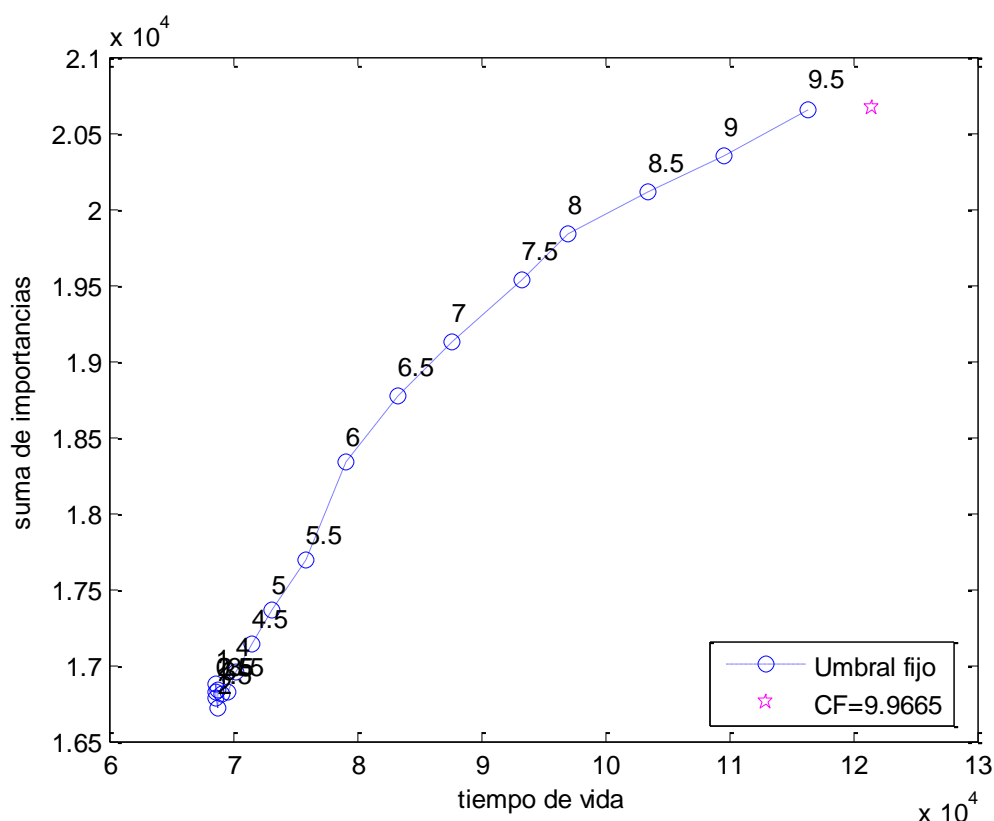
Es llamativo el hecho de que para una distribución exponencial, al contrario de lo que ha venido ocurriendo hasta ahora, el tiempo transitorio sea inferior que para la uniforme. La explicación reside en el valor inicial que recibe el umbral de transmisión, que en este caso es igual al parámetro  $\sigma$  de la distribución exponencial utilizada, que es 5.

#### 5.1.4.3. Importancias con distribución de probabilidad de Pareto

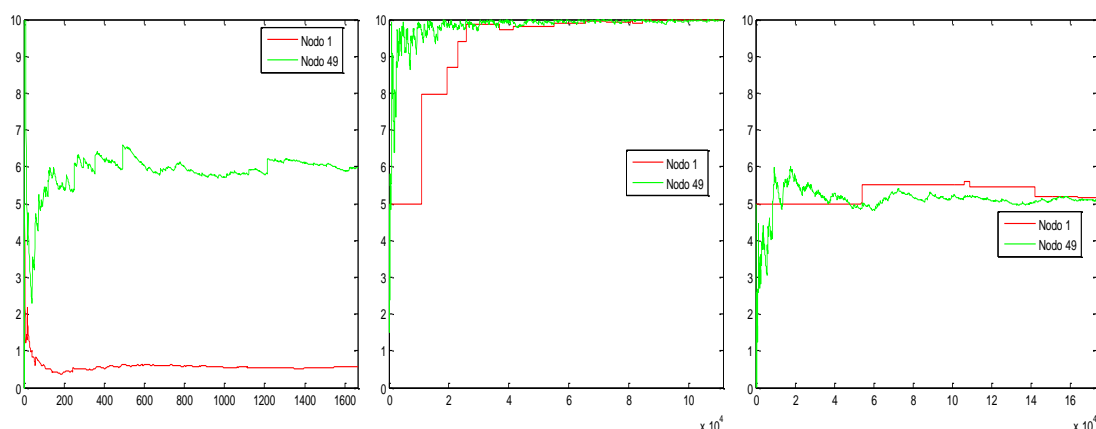




**Figura 5-34: Rendimiento de los algoritmos en una red de 50 nodos para importancias generadas con una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario simple**



**Figura 5-35: Rendimiento del algoritmo CF en una red de 50 nodos para importancias que siguen una distribución de probabilidad de Pareto en un escenario concurrente**



**Figura 5-36: Evolución de los umbrales de transmisión LF, GF y CF (de izquierda a derecha) para el primer y penúltimo nodo utilizando importancias según una distribución de probabilidad de Pareto**

El comentario más relevante que debe hacerse sobre la evolución del umbral de transmisión en este caso es su tasa de actualización, que es realmente baja. Y es que propagar el umbral de transmisión mediante asentimientos, en una situación en la que la

probabilidad de transmitir un mensaje es tan baja, se evidencia con estas gráficas como una mala práctica, por lo que se concluye que para entornos similares a este es necesario utilizar técnicas activas de propagación del umbral de transmisión. En otras palabras, es recomendable lanzar mensajes dedicados exclusivamente a compartir el valor del umbral.

## 5.2. Topología de red de árbol

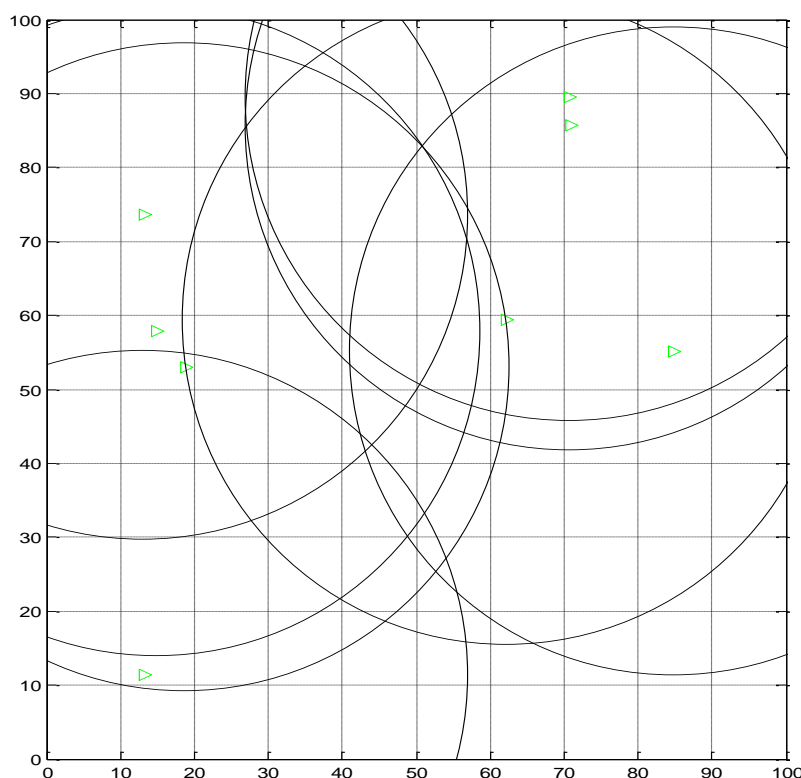
Una vez se dispone de los resultados para la topología de red en línea, se expone a continuación los desarrollos y conclusiones obtenidas acerca del uso de estas estrategias en redes más complejas, tomando como base la estructura arbórea.

### 5.2.1. Elaboración del entorno

Para poder hacer un estudio sobre este tipo de redes fue necesario generar un entorno de simulación representativo que estableciera un número de nodos en un área, y los enlazara según una estructura arbórea de forma automática.

En primer lugar, el programa genera posiciones aleatorias para los nodos dentro de una cuadrícula de 100x100 unidades.

Una vez posicionados, es necesario establecer un radio de cobertura para los nodos que permita interconectar toda la red. Para ello, se toman las distancias que hay entre cada nodo y su vecino más cercano, y se establece como radio de cobertura para todos los nodos la mayor de esas distancias.



**Figura 5-37: Representación de los radios de cobertura de los nodos**

En este punto, es necesario definir un método para que cada nodo decida cuál será el destinatario de sus mensajes. Se aplica la técnica del *greedy forwarding*, que tal y como se describió en el capítulo 2.3, establece como siguiente salto aquél que más distancia le permite avanzar en dirección a la estación base.

Es evidente que debe haberse asignado las funciones de estación base a uno de los nodos antes de comenzar con el encaminamiento. Se proporcionan a continuación los resultados obtenidos de posicionar la base en un extremo y en el centro del mapa generado.

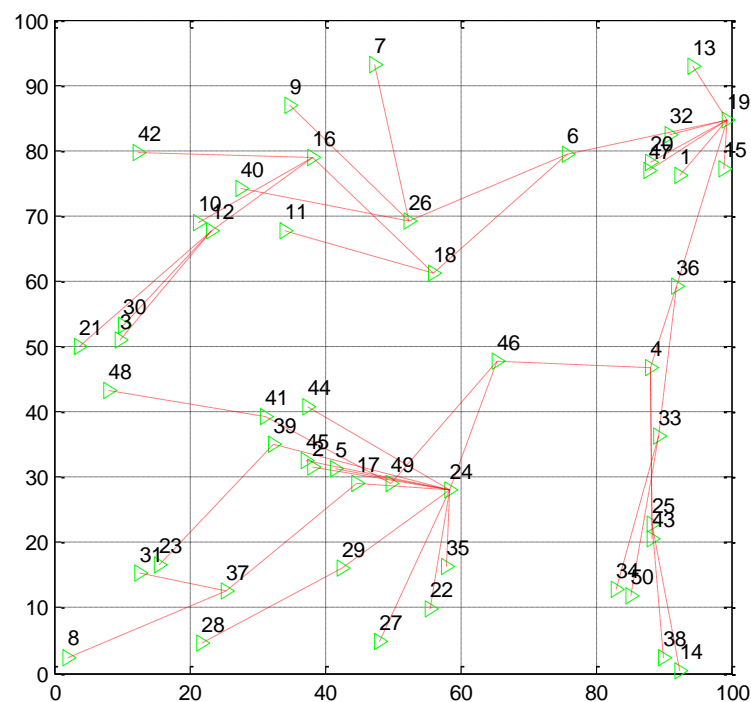
## 5.2.2. Resultados

Tras haber probado las distintas distribuciones de probabilidad para generar los mensajes de la red, se proporciona a continuación un estudio de las distintas formas para una estructura arbórea, utilizando una distribución de probabilidad uniforme.

### 5.2.2.1. Estación base en un extremo del mapa

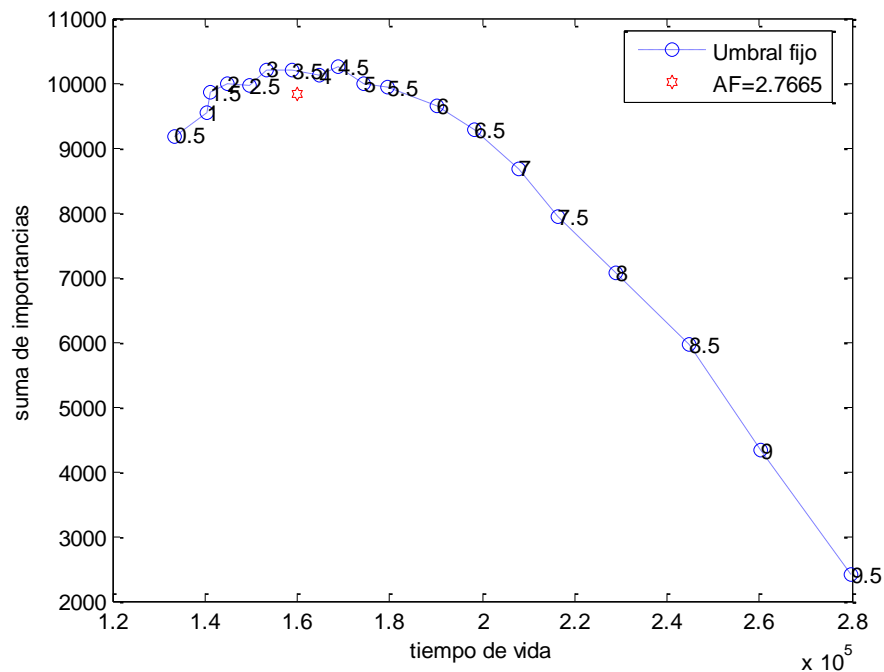
Para estas simulaciones, el nodo que hará las veces de estación base será aquél situado más arriba a la derecha en el área definida.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo del aspecto que presentaría una de estas redes.



**Figura 5-38: Representación de una red de árbol de 50 nodos con la base en un extremo**

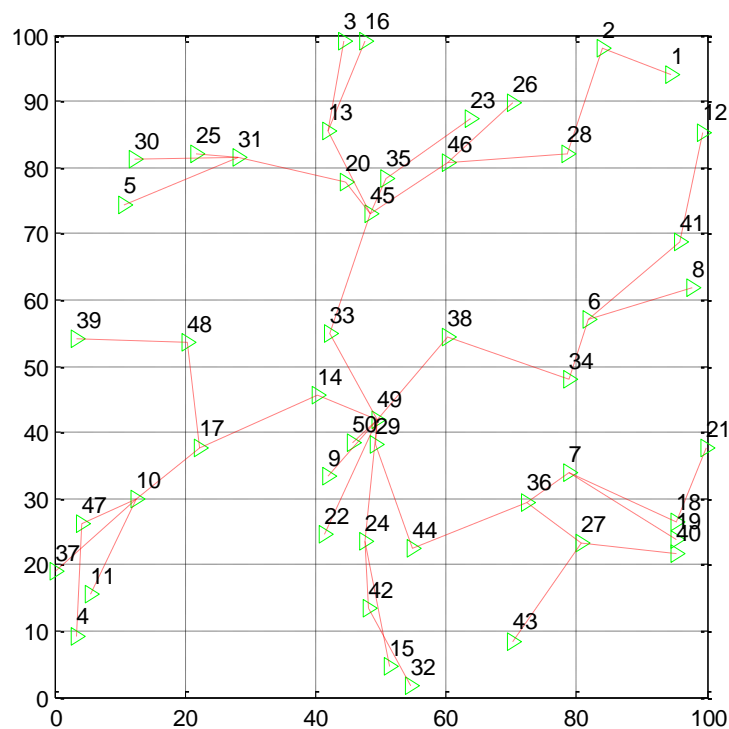
Reutilizando en su mayor parte el código que permite simular una red en línea en un con funcionamiento concurrente, es posible visualizar el comportamiento del algoritmo CF (en la leyenda de las gráficas de este capítulo, AF) para una red de topología arbórea.



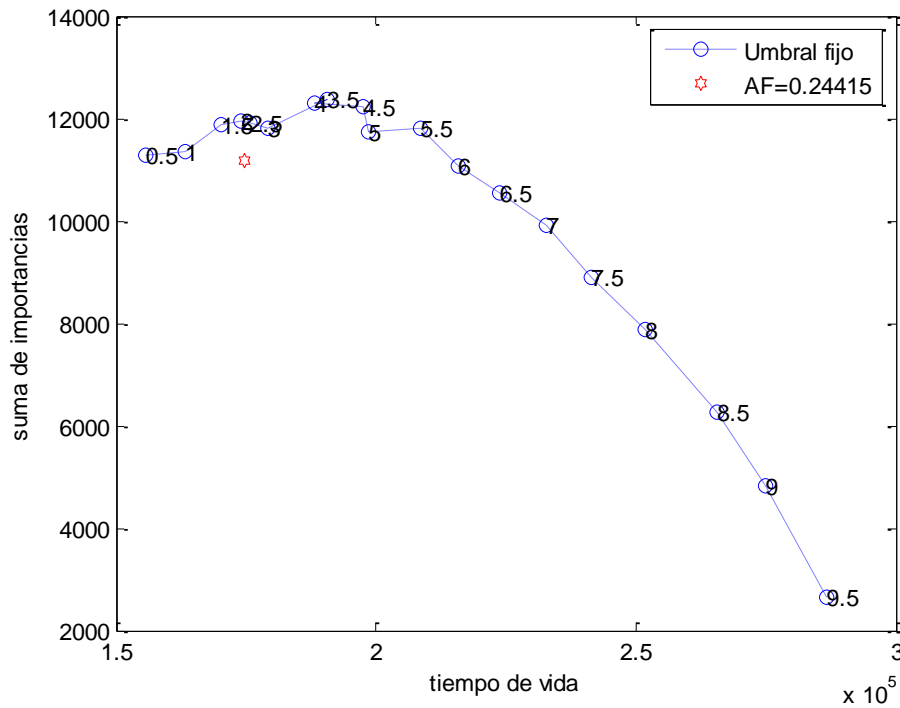
**Figura 5-39: Rendimiento del algoritmo CF aplicado a una red de topología arbórea con la base en un extremo del mapa**

El algoritmo presenta también en este caso un funcionamiento satisfactorio, estando la suma de importancias que llega a la base muy cerca de su valor óptimo.

#### 5.2.2.2. Estación base centrada en el mapa



**Figura 5-40: Representación de una red de árbol de 50 nodos con la base en el centro**



**Figura 5-41: Rendimiento del algoritmo CF aplicado a una red de topología arbórea con la base en el centro del mapa**

Como en el caso anterior, el algoritmo presenta una buena eficiencia, aunque algo peor, pues los nodos de todas las ramas están utilizando el umbral que calcula el penúltimo nodo de una de ellas (la más congestionada).

Por otro lado, se obtiene un resultado que permite confirmar los estudios que aparecen en [38], que afirma que cuanto más centrada en el área de despliegue está la base, mayor es la importancia total recibida para una misma cantidad de energía consumida. Y es que en este caso se superan los 12000, mientras que en el anterior llegaban alrededor de 10000.



# Capítulo 6

## Conclusiones y líneas futuras

En este punto queda completo el estudio del estado del arte y los dispositivos, la implementación del entorno de simulación y la ejecución de simulaciones para distintos escenarios.

A la vista de los resultados, es el momento de hacer una valoración crítica del trabajo realizado que permita clarificar hasta qué punto llega el alcance de la implementación, y qué conclusiones se obtienen de ellos.

En función de ello, pueden definirse las líneas de actuación lógicas que deben seguirse para ampliar el espectro de resultados o concretar más alguno de los que ya se han obtenido.

## 6.1. Conclusiones

Son muchas las estrategias que se han encontrado para optimizar el uso de baterías en redes de sensores inalámbricos. Entre ellas, se ha focalizado el esfuerzo en aquéllas que atañen directamente al sistema de comunicación inalámbrica, identificado como la fuente de consumo más importante de las motas.

Ya en las primeras decisiones de diseño de la red, que establecen el número de nodos, la distancia entre ellos y topología de despliegue, pueden tomarse algunas medidas para minimizar el coste a la hora de transmitir mensajes. La expresión (2-19) define de forma concreta la distancia máxima a la que deberían colocarse los nodos en función de las características del canal de transmisión.

Además, existen multitud de protocolos MAC a elegir, cada uno adaptado a necesidades muy específicas de una red, y priorizando en cada caso un parámetro, como puede ser el tiempo de llegada de un mensaje, robustez del enlace u optimización de energía.

De entre las estrategias que optimizan la energía consumida por el uso del subsistema radio de las motas, el objetivo principal de este proyecto son los algoritmos de comunicación selectiva, que establecen un umbral de transmisión para evitar el consumo de batería al enviar mensajes con poca importancia.

Se concluye que se ha completado el alcance previsto del proyecto en cuanto a la evaluación de estos algoritmos para distintos escenarios más realistas que los empleados en la literatura de referencia. Para ello se ha empleado la información que aparece en las hojas de catálogo de dispositivos comerciales reales, a partir de la cual se ha dado valor a los parámetros que definen el consumo de las motas en función de las acciones que realizan.

Como valoración del software de simulación, se destaca:

- Diferenciación clara entre dos entornos muy distintos. Uno simple, en el que hasta que un mensaje no alcanza la estación base no hay ningún sensor tomando medidas. Otro concurrente, en el que todos los sensores toman ininterrumpidamente, según una probabilidad  $P_S$ , medidas que luego transmiten hacia la base.
- Es un código genérico que acepta distintos valores para poder modelar diferentes escenarios. En concreto, es adaptable al número de nodos de la red, a la distribución de importancias empleada, y al consumo de energía asociado para cada estado. Sin embargo, no es adaptable a otros protocolos MAC, ya que el funcionamiento general está basado en el protocolo concreto VTS.
- Para redes con la cantidad mínima de nodos los resultados no son satisfactorios. Se observa entonces la necesidad de identificar si el problema reside en el modo de funcionamiento del simulador o si realmente los algoritmos no aportan buenos resultados en estos casos.

Desde un punto de vista global, los resultados se consideran válidos en tanto que se aproximan a los valores esperados teóricamente en los artículos de la bibliografía que tratan estos algoritmos. Gracias a esta confirmación, se constatan las siguientes conclusiones de forma sólida:

- En un entorno no concurrente, es preferible utilizar el algoritmo GF frente al LF, sobre todo cuando el número de nodos de la red es considerable. Se ha



- 
- demostrado que el algoritmo centralizado LF pierde eficiencia según aumenta el número de nodos, mientras que el GF se mantiene muy cerca del umbral óptimo.
- El algoritmo CF ve penalizado su resultado conforme más asimétrica es la distribución de importancias de los mensajes, siendo la distribución uniforme la que permite obtener los mejores resultados.
  - Se ha detectado un efecto indeseable en los algoritmos centralizados. Como el umbral es calculado en el penúltimo nodo de la red, éste debe ser retransmitido hacia todos los nodos anteriores. Si se utiliza, como en el caso de las simulaciones llevadas a cabo, los asentimientos de los mensajes para difundir esta información sin coste energético añadido, se observa una latencia que aumenta conforme más nodos tiene la red. Este efecto aleja el resultado global del que se obtendría en un caso ideal.
  - La suma total de importancias que llega a la base es menor cuanto mayor es el número de nodos de la red, por lo que se puede afirmar que una red devolverá mejores resultados con caminos de transmisión más cortos.
  - Cuanto menor es la probabilidad global de transmitir un mensaje, ya sea debido a la distribución de importancias, la probabilidad de tomar una medida o el umbral utilizado, más largo es el estado transitorio de la red, pues se tarda más tiempo en distribuir el umbral a todos los nodos. Esto implica una mayor cantidad inicial de batería necesaria para considerar eficiente el sistema.
  - En cuanto a las redes con topología arbórea, se concluye que los resultados mejoran cuanto más cercana al centro del área de despliegue está la base.

A partir de estas conclusiones es posible definir las líneas de actuación lógicas que permitirían ratificar los resultados y ampliar los escenarios a los que son aplicables estas estrategias a partir del software actual.

## 6.2. Líneas futuras

Se considera que los próximos objetivos que se deberían abordar en el estudio de las comunicaciones selectivas a partir de este proyecto son, por un lado, ampliar el tipo de redes que se pueden simular, y por otro, intentar mejorar los resultados obtenidos teniendo en cuenta los resultados menos satisfactorios encontrados.

Para hacer aun más genérico y realista el entorno de simulación, se propone:

- Tener en cuenta la distancia a la que se sitúan los nodos, y con ello:
  - Establecer una relación entre esa distancia y la potencia requerida para transmitir mensajes, y, haciendo uso de los valores de consumo de corriente tabulados en la especificación de los dispositivos comerciales, asignar de forma automática el parámetro  $E_T$ .
  - Incluir el modelo de pérdidas de bits mencionado en 2.5, y poner a prueba los algoritmos asignando el valor correspondiente a  $Q$ , en la expresión (2-9). Implementar además los sistemas de transmisión nombrados (EER y HHR) para ponerlos a prueba.
- Implementar otros protocolos MAC más complejos que permitan, por ejemplo, la simulación de una red con topología mallada. Se podrá además modelar colisiones y conseguir así unos resultados más realistas. Por otro lado, también sería posible

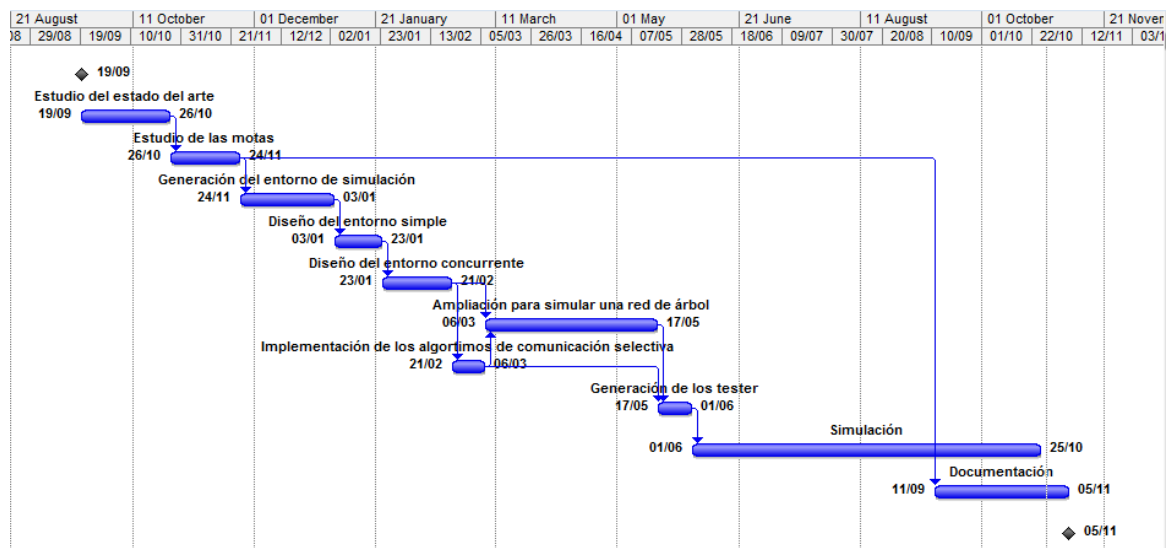
abordar casos con redundancia, en los que un nodo pueda redireccionar sus mensajes en caso de que su destinatario caiga.

- Estudiar la posibilidad de propagar el umbral de transmisión en los casos centralizados utilizando mensajes específicos para ello. Esto mejoraría la latencia que se observa en la propagación del umbral, pero conllevaría un sobre coste energético.
- Analizar redes con todos que dispongan de programas de apagado y encendido periódico.
- Tener en cuenta la inclusión de dispositivos con los llamados *harvesting sensors*, que disponen de la tecnología para recargar ligeramente sus baterías a partir de la energía que absorben durante las medidas que realizan los sensores.

# Capítulo 7

## Presupuesto

### 7.1. Organización del proyecto



### 7.2. Presupuesto



## UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID Escuela Politécnica Superior

### PRESUPUESTO DE PROYECTO

#### 1.- Autor

Javier Baltasar Palma

#### 2.- Departamento

Teoría de la señal y las Comunicaciones

#### 3.- Descripción del Proyecto

- Título **Evaluación de estrategias de comunicación selectiva para redes de sensores inalámbricos**  
 - Duración (meses) **14**  
 Tasa de costes Indirectos: **20%**

#### 4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

12.365,18 Euros

#### 5.- Desglose presupuestario (costes directos)

##### PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup>	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Jesús Cid Sueiro		Ingeniero Senior	0,18	4.289,54	0,00	
Javier Baltasar Palma		Ingeniero	3,25	2.694,39	772,12	
					8.756,77	
					0,00	
<b>Hombres mes 3,43</b>				<b>Total</b>	<b>9.528,88</b>	

<sup>a)</sup> 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)  
 Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

##### EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
Ordenador	1.000,00	100	14	60	233,33
Programa de simulación	2.000,00	100	12	60	400,00
Programas de documentación	600,00	100	14	60	140,00
2 circuitos interfaz USB a I2C	48,29	10	2	60	0,16
16 minisensores con soporte	580,64	10	2	60	1,94
				<b>Total</b>	<b>775,43</b>

<sup>d)</sup> Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado  
 B = periodo de depreciación (60 meses)  
 C = coste del equipo (sin IVA)  
 D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

##### SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
	<b>Total</b>	<b>0,00</b>

##### OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO <sup>e)</sup>

Descripción	Empresa	Costes imputable
	<b>Total</b>	<b>0,00</b>

<sup>e)</sup> Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible,

#### 6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	9.529
Amortización	775
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	2.061
<b>Total</b>	<b>12.365</b>

# Acrónimos

ADC	Industrial, Scientific and Medical, 39
Analog to Digital Conversion, 37	
CFP	kbps
Content Free Period, 28	kbits per second, 42
CP	LEDs
Content Period, 28	Light Emitter Diode, 44
CR-SLF	<i>LF</i>
Channel Reuse-based Smallest Latest-start-time First, 27	Local selective Forwarding, 11
CSMA	LNA
Carrier Sense Multiple Access, 27	Low Noise Amplifier, 43
DAC	LPRT
Digital to Analog Conversion, 37	Low Power Real Time, 27
EEPROM	LST
Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, 37	Latest Start Time, 27
EER	LTE
End to End Retransmissions, 31	Long Term Evolution, 17
FIFO	MAC
First In First Out, 51	Medium Access Control, 4
FPGA	MDP
Field Programmable Gate Array, 37	Markov Decission Process, 10
<i>GF</i>	MFR
Global selective Forwarding, 12	Most Forward within Radius, 23
GPS	NFP
Global Position System, 29	Nearest Forward Progress, 23
HHR	PA
Hop to Hop Retransmissions, 31	Power Amplifier, 43
IEEE	PPDU
Institute of Electrical and Electronics Engineers, 40	PHY protocol data unit, 41
ISM	QoI
	Quality of Information, 10
	RAM
	Random Access Memory, 37
	RF
	Radio Frequency, 38

---

RSSI	
Received Signal Strength Index, 32	
SINR	
Signal to Interference and Noise Ratio, 19	
SNR	
Signal to Noise Ratio, 32	
SPI	
Serial Peripheral Interface, 37	
TDMA	
Time Division Medium Access, 24	
TOSSIM	
Tiny OS SIMulator, 6	
	UART
	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, 37
	VTs
	Virtual TDMA for Sensors, 26
	WiMAX
	Wireless Microwave Access, 17
	WPAN
	Wireless Personal Area Network, 39
	WSN
	Wireless Sensor Network, 2, 39, 40

# Bibliografía

1. **Massachusetts\_Institute\_of\_Technology.** Technology Review. Massachusetts : s.n., 2003.
2. **Crossbow.** *MICAz datasheet.*
3. **Ember.** *EM250 datasheet.*
4. **MEMSIC.** Imote2 datasheet.
5. **Texas Instruments.** *Tmote-Sky datasheet.*
6. **Tranberg Hansen, Morten, Arroyo-Valles, Rocío and Cid-Sueiro, Jesús.** Testing Energy-Aware Selective Communications with a Low Power Listening MAC Protocol.
7. **Arroyo-Valles, Rocío, Marques, Antonio G. and Cid-Sueiro, Jesús.** Optimal Selective Forwarding for Energy Saving in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on wireless communications.* 2011, Vol. 10.
8. **Fernández-Bes, Jesús, Arroyo-Valles, Rocío and Cid-Sueiro, Jesús.** Cooperative data censoring for energy-efficient communications in sensor networks. Madrid, España : s.n.
9. **J. Lei, R. Yates, L. Greenstein.** A generic model for optimizing single-hop transmission policy of replenishable sensors. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 8 (2). Febrero de 2009, pp. 547 - 551.
10. **S. Banerjee, A. Misra.** *Adapting transmission power for optimal energy reliable multi-hop wireless communication.* Sophia-Antipolis : Wireless Optimization Workshop, Marzo de 2003.
11. **Stojmenovic, I.** Position based routing in ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine.* 2002, Vol. 40, pp. 128 - 134.
12. **Anastasi, Giuseppe, et al.** Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey. *Ad Hoc Networks.* 2009, pp. 537-568.
13. **Zheng, Teng and Ki-Il, Kim.** A survey on real-time MAC protocols. *Communications and Network.* Jinju, Korea : s.n., 2010, pp. 104-112.
14. **David Gay, David Culler, Philip Levis.** *nesC Language Reference Manual.* Septiembre 2002.
15. **TinyOS.** TinyOS. [Online] [Cited: Octubre 23, 2012.] <http://www.tinyos.net/>.

16. **Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, David Culler.** *TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications*. s.l. : Harvard University, University of California, Intel Corporation, 2003.
17. **G. Merrett, B. Al-Hashimi, N. White, N. Harris.** Information Managed Wireless Sensor Networks with Energy Aware Nodes. *Proc. NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*. Mayo de 2005, pp. 367 - 370.
18. **S. Appadwedula, V. Veeravalli, D. Jones.** Decentralized detection with censoring sensors. *IEEE Transactions on Signal Processing* 56 (4). 2008, Vol. 4, pp. 1362 - 1373.
19. —. Energy-efficient detection in sensor networks. *IEEE Journal on Selected areas in communications* 23 (4). 2005, pp. 693 - 702.
20. **R. Arroyo-Valles, A.G. Marques, J. Cid Sueiro.** Optimal Selective Transmission under Energy Constraints in Sensor Networks. *IEEE Trans. Mobile Computing* 11 (8). 2009, pp. 1524 - 1538.
21. **Wang, Qui, Hempstead, Mark and Yang, Woodward.** A Realistic Power Consumption Model for Wireless Sensor Network Devices. Harvard University : s.n., pp. 286-295.
22. **Finn, G.G.** Routing and addressing in large metropolitan-scale internetworks. *ISI Research Report*. 1987.
23. **H.Takagi, L.Kleinrock.** Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals. *IEEE Trans. Commun.* 1984, Vol. 32, pp. 246-257.
24. **P.Larsson.** Selection Diversity Forwarding in a Multihop Packet Radio Network with Fading Channel and Capture. *Proc. ACM MobiHoc 2001*. 2001, pp. 279-282.
25. **C.Yeh.** Variable Radius Routing Protocols for High Throughput, Low Power, and Small Latency in Ad Hoc Wireless Networks. *IEEE Int'l Conf. WLANs and Home Networks*. 2001.
26. **R.Jain, A.Puri, and R.Sengupta.** Geographical Routing Using Partial Information for Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Pers. Commun.* 2001, pp. 48-57.
27. **I.Stojmenovic, Xu Lin.** Power Aware Localized Routing in Wireless Networks. *IEEE Trans. Parallel Dist. Sys.* 2001, Vol. 12, pp. 1122-1133.
28. **P.Bose.** Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks. *3rd Int'l Wksp. Discrete Algorithms Methods Mobile Comp. Commun.* Seattle : s.n., 1999, pp. 48-55.
29. **L.Barriere.** Robust Position Based Routing in Wireless Ad Hoc Networks with Unstable Transmission Ranges. *Discrete Algorithms Methods for Mobile Comp. and Commun.* 2001, pp. 19-27.
30. **W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin.** An Energy-Efficient Mac Protocol for Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. New York : s.n., 23-27 June 2002, pp. 1567-1576.
31. **Victor Shnayder, Mark Hempstead, Bor-rong Chen, Geoff Werner Allen, Matt Welsh.** *Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Applications*. Harvard University : Division of Engineering and Applied Sciences.



- 
32. **T. van Dam, K. Langendoen.** An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. [book auth.] Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Network Sensor System. Los Angeles : s.n., 2003, pp. 171 - 180.
  33. **T. H. Hsu, J. S. Wu.** An Application-Specific Duty Cycle Adjustment MAC Protocol for Energy Conserving over Wireless Sensor Networks. *Computers Communications*. Noviembre de 2008, Vol. 31, pp. 4081 - 4088.
  34. **R. Yadav, S. Varma, N. Malaviya.** Optimized Medium Access Control for Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Science and Network Security*. Febrero de 2008, Vol. 8, 2, pp. 334 - 338.
  35. **P. Lin, C. Qiao, X. Wang.** Medium Access Control with a Dynamic Duty Cycle for Sensor Networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Net-working Conference*. Atlanta : s.n., 21-25 Marzo de 2004, pp. 1534 - 1539.
  36. **S. Banerjee, A. Misra.** *Energy reliable communication for multihop wireless networks*. s.l. : Wireless Networks (WINET).
  37. **IEEE.** 802.15.4. 2009.
  38. **J.L.Gao.** Analysis of Energy CONsumption for Ad Hoc Wireless Sensor Networks Using a Bit-Meter-per-Joule Metric. [book auth.] IPN Progress Report. 2002.
  39. **Crossbow.** *Imote2 Hardware Reference Manual*. Septiembre de 2007. PN: 7430-0409-01.
  40. **P. Bose, P. Morin, I. Stojmenovic, J. Urrutia.** *Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks*. Seattle : ACM DIAL M Workshop, Agosto de 1999.
  41. **S.A.Ade, P.A.Tijare.** Performance Comparison of AODV, DSDV, OLSR and DSR Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*. 2010, Vol. 2, pp. 545-548.
  42. **Stojmenovic, Ivan, et al.** Physical layer impact on the design and performance of routing and broadcasting protocols in ad hoc and sensor networks. *Computer Communications*. 2005, Vol. 28, pp. 1138-1151.
  43. **Tranberg Hansen, Morten, Arroyo-Valles, Rocío and Cid-Sueiro, Jesús.** Testing Selective Transmission with Low Power Listening. 2010, pp. 146-153.